



Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico

**“Evaluación de Herramienta Tecnológica como
Apoyo a las Estrategias frente a Derrames de
Hidrocarburos en el Mar”**

María Karina Oyarce Lineros

Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Naturales, 2009

DECLARACIÓN

Este trabajo o alguna de sus partes no han sido presentados anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria o extranjera y organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación, sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

DEDICATORIA

A mis padres, Nora y Eduardo.

A mi hermano

Con todo mi cariño.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a las personas que me apoyaron en el transcurso de mi carrera universitaria, mis padres Eduardo y Nora, por su preocupación y esfuerzo por entregarme las mejores herramientas para desempeñarme en el mundo laboral y en la vida.

También quiero agradecer a quienes contribuyeron a la realización de este trabajo. Particularmente agradezco a mi profesor guía, Aldo Fedele por su apoyo incondicional. Doy gracias además, a los profesores Patricio Winckler y Mario Cáceres, por hacerse partícipes de este estudio.

También quiero agradecer a OceanGreen S.A., que proporcionaron con fines académicos y en forma gratuita, registros y datos imprescindibles para el desarrollo de este estudio.

CONTENIDOS

DECLARACIÓN.....	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
CONTENIDOS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
RESUMEN.....	VIII
1 ANTECEDENTES GENERALES	1-1
1.1 INTRODUCCIÓN	1-1
1.2 OBJETIVOS	1-1
1.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	1-2
1.4 ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO	1-2
1.5 DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN CHILE.....	1-2
1.6 MODELACIÓN DEL DERRAME DE HIDROCARBUROS EN EL MAR	1-4
1.7 COMPORTAMIENTO DE LOS HIDROCARBUROS EN EL MAR	1-5
2 DESCRIPCIÓN DE MODELOS RMA2 Y RMA4	2-1
2.1 INTRODUCCIÓN	2-1
2.2 MODELO HIDRODINÁMICO RMA2.....	2-1
2.3 MODELO DE CALIDAD DE AGUA RMA4	2-8
2.4 PROCESOS DE MODELACIÓN	2-12
3 APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO	3-1
3.1 INTRODUCCIÓN	3-1
3.2 ÁREA DE ESTUDIO	3-1
3.3 SECTOR POSIBLE DE DERRAME	3-3
3.4 CONDICIONES AMBIENTALES	3-4
3.5 GENERACIÓN DE GRILLA COMPUTACIONAL	3-10
3.6 CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO	3-14
4 RESULTADOS.....	4-1
4.1 HIDRODINÁMICA DE BAHÍA QUINTERO	4-1
4.2 DERRAME DE HIDROCARBURO EN BAHÍA QUINTERO.....	4-8
5 CONCLUSIONES	5-1
5.1 RECOMENDACIONES	5-3
6 REFERENCIAS.....	6-1
7 ANEXOS	7-1
ANEXO A: TASAS DE TRANSFERENCIAS DE TERMINALES MARÍTIMOS (2000 – 2007).....	7-1
ANEXO B: MEDIO AMBIENTE FÍSICO DE LA BAHÍA DE QUINTERO.....	7-30
ANEXO C: CARTA AUTORIZACIÓN PARA EL USO DE DATOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS	7-36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1: Escala bunker, números de fuel oil (FO) ASTM y número IFO.....	1-7
Tabla 1-2: Comparación de características físicas de algunos productos derivados de petróleo.....	1-8
Tabla 1-3: Procesos de envejecimiento y escalas de tiempo para respuestas de emergencia.....	1-10
Tabla 3-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio.....	3-5
Tabla 3-1: Valores no -armónicos obtenidos del análisis de mareas en la Bahía de Quintero.....	3-6
Tabla 3-3: Información de la malla.....	3-14
Tabla A-1: Tasas de transferencia de los terminales, 2000 a 2007.....	7-1
Tabla A-2: Registros históricos de derrames ocurridos en la Bahía de Quintero.....	7-3
Tabla B-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio.....	7-30
Tabla B-2: Valores No - Armónicos.....	7-32
Tabla B-3: Estadística básica del viento (Agosto – Noviembre 2006).....	7-33
Tabla B-4: Frecuencia de incidencia del viento Agosto – Noviembre 2006).....	7-33
Tabla B-5: Estadística básica de las celdas de corrientes.....	7-35
Tabla B-6: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 16.....	7-36
Tabla B-7: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 8.....	7-36
Tabla B-8: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 2.....	7-36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Ocurrencias de hidrocarburos derramados en Chile desde 2000 al 2006.....	1-3
Figura 1-3: Esquema del proceso intemperización del hidrocarburo derramado en el mar.....	1-9
Figura 1-4: Influencia de la velocidad del viento con la velocidad de la corriente.....	1-12
Figura 1-5: Diagrama de información necesaria para modelación de derrame de hidrocarburos.	1-13
Figura 2-1: Ejemplo de condición inicial dinámico como condición de borde.	2-6
Figura 2-2: Diagrama del proceso de modelación hidrodinámico y de calidad de agua.....	2-12
Figura 3-1: Área de estudio Bahía de Quintero, V Región, Chile.	3-1
Figura 3-2: Sector portuario de la Bahía de Quintero, V Región, Chile.	3-2
Figura 3-3: Porcentajes de hidrocarburos manipulados por terminales marítimos.	3-3
Figura 3-4: Porcentajes de tasas de transferencia de hidrocarburos por terminales marítimos.	3-4
Figura 3-5: Ubicación de equipos utilizados en estudio.	3-4
Figura 3-6: Registro de Nivel Medio del Mar de la bahía de Quintero, V Región, Chile.	3-6
Figura 3-7: Circulación de las corrientes – Escobar et al 1971.....	3-7
Figura 3-8: Circulación de las corrientes – Bakovic y Balic, 1984.	3-8
Figura 3-9: Circulación de las corrientes – Malet y Andrade, 1991.	3-8
Figura 3-10: Región de modelación.....	3-10
Figura 3-11: Batimetría de la región de modelación.	3-12
Figura 3-12: Malla de elementos finitos empleada en modelo hidrodinámico.	3-13
Figura 3-13: Propagación de onda de marea.....	3-15
Figura 3-14: Resultado del desfase en la región de contorno abierta.....	3-16
Figura 3-15: Señal de marea.	3-16
Figura 4-1: Comparación mareas observada versus simulada.....	4-2
Figura 4-2: Correlación componente u – serie observada v/s modelada de corrientes.	4-2
Figura 4-3: Correlación componente v – serie observada v/s modelada de corrientes.	4-3
Figura 4-4: Simulación dinámica – 3 horas.....	4-3
Figura 4-5: Simulación dinámica – 6 horas.....	4-4
Figura 4-6: Simulación dinámica – 9 horas.....	4-4
Figura 4-7: Simulación dinámica – 12 horas.....	4-5
Figura 4-8: Simulación dinámica – 15 horas.....	4-5
Figura 4-9: Simulación dinámica – 18 horas.....	4-6
Figura 4-10: Simulación dinámica – 21 horas.....	4-6
Figura 4-11: Simulación dinámica – 24 horas.....	4-7
Figura 4-12: Vector progresivo corriente superficial.	4-7
Figura 4-13: Comparación magnitud de corrientes observada versus simulada.	4-8
Figura 4-14: Correlación marea observada versus simulada.	4-8
Figura 4-11: Escenarios analizados por el modelo de calidad de agua RMA4.....	4-9
Figura B-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio.	7-30
Figura B-2: Rosa y distribución de frecuencia de vientos.	7-34

Figura B-3: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 16.....	7-37
Figura B-4: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 8.....	7-37
Figura B-5: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 2.....	7-38
Figura B-6: Diagrama de vector progresivo - nivel superficial.	7-39
Figura B-7: Diagrama de vector progresivo - nivel intermedio.	7-39
Figura B-8: Diagrama de vector progresivo - nivel profundo.	7-40

RESUMEN

Debido al interés en evaluar y disminuir el daño ambiental que se produce como consecuencia directa de derrames de hidrocarburos en el ambiente acuático, el presente trabajo propone implementar el modelo hidrodinámico RMA2 y de calidad de agua RMA4 desarrollados por el U.S. Army Corps of Engineers – USACE, los cuales serán aplicados en la Bahía de Quintero caracterizando el proceso físico de dispersión que afecta el transporte o movimiento del petróleo en el mar, permitiendo evaluar sus ventajas y/o inconvenientes. Además, los resultados obtenidos en el presente trabajo permitirán a la Autoridad Marítima saber si estos modelos entregan información válida para realizar sus planes de contingencia.

Para implementar los modelos computacionales RMA2 y RMA4, es necesario conocer el campo de corrientes generados por mareas en la Bahía de Quintero, implementándose el modelo hidrodinámico por medio de una simulación dinámica de 25 horas, a partir de datos de mareas y vientos medidos en la campaña de terreno realizada durante agosto a noviembre del 2006.

Para conocer la evolución de un derrame de hidrocarburo se implementó el modelo hidrodinámico RMA4, realizando una descarga de hidrocarburo accidental en un sector seleccionado a través del análisis de los registros históricos de derrames ocurridos. Obteniendo que el sector de ubicación de la Monoboya, es históricamente el que posee mayor ocurrencia de derrames de hidrocarburos. Por otro lado, el tipo de hidrocarburo a ser derramado fue elegido considerando los tipos de hidrocarburos transportados y/o transferidos en la Bahía de Quintero; en cuanto al tiempo de desplazamiento, los derrames ocurridos en el sector de la Monoboya han impactado la zona costera en lapsos de horas, en general dentro de las 6 primeras horas lo que ha sido dependiente de las características del hidrocarburo y de las condiciones meteo-oceanográficas imperantes durante la emergencia.

Los resultados obtenidos mediante la modelación matemática, contrastados con la ocurrencia de eventos reales en la Bahía de Quintero y en consideración a los antecedentes proporcionados por personal perteneciente a la Autoridad Marítima en cuanto a la ocurrencia de derrames ocurridos en el sector de la Monoboya, señalan/muestran que el mayor número de derrames han ocurrido próximos al período estival, es decir, frente a una clara predominancia de vientos del 2^{do} y 3^{er} cuadrante. Estableciendo un escenario general frente a las características observadas en estas emergencias, se señala que éstos han mostrado un desplazamiento de las manchas predominantemente hacia el 2^{do} y 3^{er} cuadrante, es decir, hacia el sector de playa Loncura.

1 ANTECEDENTES GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

La ocurrencia, evolución y efectos nocivos de derrames de petróleo en el medio ambiente marino han hecho necesario el establecimiento de planes de respuesta frente a la generación de este tipo de accidentes. La velocidad de desplazamiento de estos eventos condicionará el tiempo de respuesta disponible para activar los planes de contingencia, siendo imprescindible una herramienta tecnológica que permita estimar su distribución espacial y temporal, elementos centrales de toda planificación ante emergencias ambientales de este tipo.

Es por ello que en el presente trabajo se emplea el modelo hidrodinámico RMA2 y de calidad de agua RMA4, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers – (USACE), los cuales son implementados y aplicados en la Bahía de Quintero, lo que permitirá evaluar sus ventajas y/o inconvenientes. Además, los resultados obtenidos permitirán a la Autoridad Marítima saber si estos modelos son capaces de proporcionar información válida para realizar planes de contingencia, los cuales requieren conocer la evolución de un potencial derrame con el fin de disponer de mecanismos y herramientas necesarias para la contención y recolección del producto derramado.

El modelo bidimensional hidrodinámico RMA2 permite simular flujos naturales de superficie libre utilizando el método de elementos finitos para calcular las velocidades integradas en la vertical. Para simular el transporte de hidrocarburos se aplica el modelo RMA4, el cual aplica la ecuación bidimensional de advección – dispersión. Además, se analizaron datos de mareas, vientos y corrientes de la Bahía de Quintero que permitirán alimentar los modelos hidrodinámicos y validar los resultados de éstos. Los datos fueron medidos durante las campañas de terreno realizado en agosto – noviembre del año 2006. El análisis se realizó cumpliendo con los estándares requeridos por Instrucción Hidrográfica y Oceanográfica de la Armada de Chile N° 3201.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es caracterizar el proceso físico de dispersión que afecta al transporte o movimiento del petróleo en el mar mediante la modelización bidimensional a través de los modelos RMA2 y RMA4. Además, se evaluarán las ventajas y/o inconvenientes en la implementación y aplicación de dichos modelos como una estrategia de prevención y respuesta frente a un derrame de hidrocarburo cerca de la zona costera. Para ello, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Modelar el proceso físico de dispersión que determina el transporte de petróleo en el mar utilizando los modelos RMA2 y RMA4, y evaluar su aplicación como herramienta de prevención y respuesta frente a derrame de hidrocarburo costero.
- Aplicar los resultados obtenidos de la modelación bidimensional a un derrame simulado en la Bahía de Quintero, V Región; cuya validación se realizará a partir de mediciones de corrientes, mareas y vientos *in situ*.

1.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

En los primeros instantes luego de ocurrido un derrame, la carencia de información respecto del comportamiento del petróleo resulta ser relevante frente a la adopción de decisiones de respuesta.

Las limitaciones que se pueden encontrar al tratar con este tipo de problemas son:

- Los derrames ocurren de modo instantáneo y accidental, por lo que la determinación del volumen de vertido y las propiedades físicas y químicas del petróleo son difíciles de conocer *a priori*.
- Sólo el comportamiento de la mancha superficial del contaminante puede ser simulado con las herramientas disponibles. El comportamiento por debajo de la superficie del agua, está fuera del alcance y objetivos de este proyecto.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO

Para el desarrollo de los objetivos propuestos, se ha estructurado la memoria de la siguiente forma:

En el Capítulo 1, se expone la motivación del problema a tratar en Chile, la descripción de los diferentes procesos físicos que tienen lugar en un derrame como son la evaporación, disolución, dispersión y emulsificación, por mencionar algunos. Además de una descripción de clasificación por volumen de petróleo derramado.

En el Capítulo 2 se presenta la descripción e implementación de aspectos generales de los modelos a utilizar, como son la elección del intervalo temporal a utilizar y condiciones de contorno.

En el Capítulo 3 se describe las condiciones oceanográficas generales de la Bahía de Quintero y se selecciona el hidrocarburo a utilizar y la zona a realizar la descarga a partir de las tasas de transferencias. Además se describen las condiciones de contornos a ser implementados para simular la hidrodinámica y el derrame del petróleo seleccionado a partir de las tasas de transferencia.

En el Capítulo 4 se describen los resultados obtenidos y finalmente, en el Capítulo 5 se recopilan las conclusiones obtenidas en este trabajo y se proponen futuras líneas de investigación abiertas en el campo de la modelación de procesos de difusión-advención aplicados a las manchas de petróleo.

1.5 DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN CHILE

Siendo las tres cuartas partes de la Tierra agua, los fenómenos naturales que en ella ocurren suelen ser, a menudo, de tales intensidades que resultan ser la principal causa de accidentes marítimos, siendo además la vía más utilizada para el transporte de mercancías a través del mundo, específicamente para el caso particular de los hidrocarburos.

Debido a lo anterior, son innumerables los siniestros, consecuencias de los derrames de hidrocarburos que han afectado negativamente la calidad del agua de mar, principalmente, en las zonas costeras consideradas como áreas críticas, dado a la cantidad de especies marinas que acceden a dichos sectores con el propósito de reproducirse o simplemente alimentarse. Asimismo,

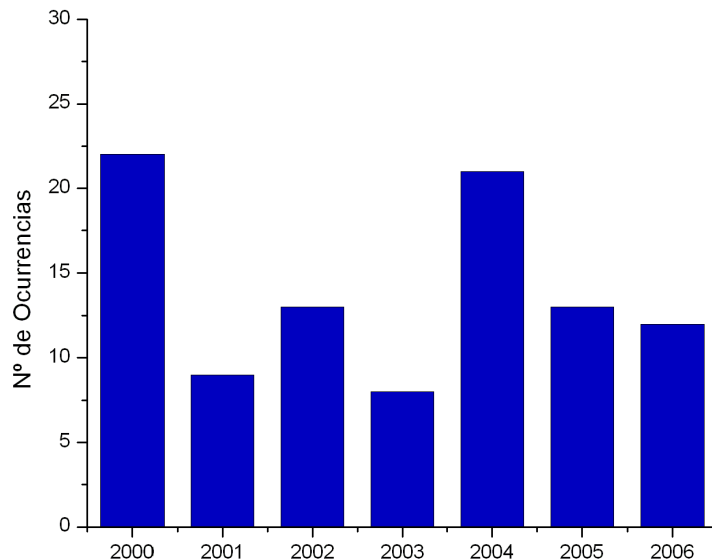
el hombre, quien ha desarrollado una gran cantidad de actividades económicas (industriales y turísticas, entre otras), por lo que la importancia que reviste esta área es aún mayor.

Las principales causas de los accidentes marítimos que terminan en derrames de hidrocarburos suelen ser:

- Falla de material del buque por mal estado, falta de mantenimiento u otras deficiencias del material.
- Falla humana por causas objetivas (fatiga y método de trabajo) o causas subjetivas (directamente conectadas con variables humanas).
- Condiciones ambientales.

Con el fin de salvaguardar la seguridad y protección ambiental, la Autoridad Marítima de Chile cuenta con procedimientos y procesos de seguridad ante derrames accidentales de hidrocarburos, derivados de errores humanos, fenómenos meteorológicos, por mencionar algunas de las causas más recurrentes que causan impactos, muchas veces nefastos en los cuerpos de agua (por ejemplo, el océano). En estos casos, la Autoridad Marítima realiza acciones inmediatas para mitigar los impactos provocados. La Autoridad Marítima de Chile, cuenta con información histórica de los derrames acontecidos en Chile; a continuación se muestra el número de ocurrencias de accidentes de derrames de hidrocarburos entre los años 2000 y 2006 (Figura 1-1), en donde el año 2000 ocurren 22 accidentes de un total de 98 accidentes entre los años 2000 y 2006.

Figura 1-1: Ocurrencias de hidrocarburos derramados en Chile desde 2000 al 2006.

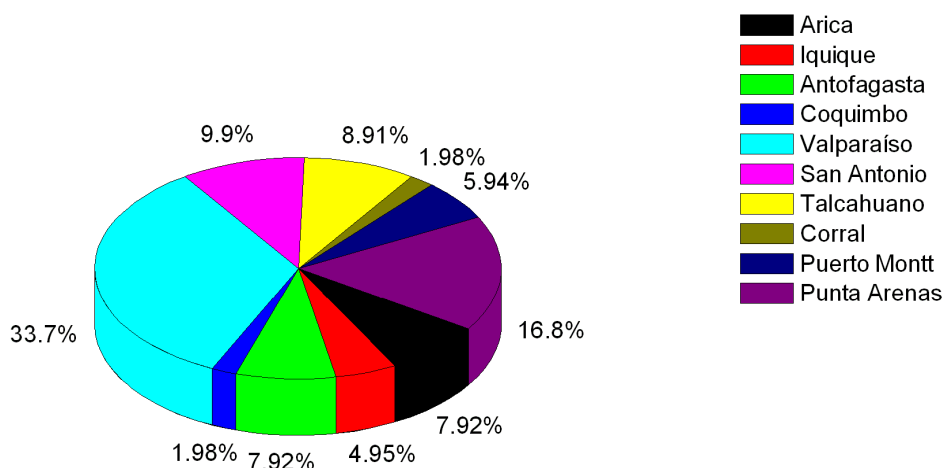


Fuente: DIRECTEMAR. 2009. Departamento de Preservación del Medio Ambiente Acuático y Combate a la Contaminación [fecha de consulta: 04/05/2009]. Disponible en: <http://www.directemar.cl/>

Además, los porcentajes de ocurrencia de los derrames de hidrocarburos durante los años 2000 al 2006 para los puertos patrones (Figura 1-2), muestra que el 33,7% de los derrames han ocurrido en la jurisdicción de la Gobernación Marítima de Valparaíso, la mayoría producidos por el rebalse

del estanque de embarcaciones de diversas banderas; mientras que la segunda jurisdicción con mayor ocurrencia de accidentes es Punta Arenas (16,8%), estos accidentes en su mayoría producto de la recepción del hidrocarburo por parte de embarcaciones petroleras.

Figura 1-2: Ocurrencia de derrame de hidrocarburos por puerto patrón desde 2000 al 2006.



Fuente: DIRECTEMAR. 2009. Departamento de Preservación del Medio Ambiente Acuático y Combate a la Contaminación [fecha de consulta: 04/05/2009]. Disponible en: <http://www.directemar.cl/>

1.6 MODELACIÓN DEL DERRAME DE HIDROCARBUROS EN EL MAR

La investigación dirigida a reducir los eventuales daños sobre el medio costero causados por derrames de hidrocarburos es tema esencial en la política ambiental, aspecto primordial para iniciar medidas preventivas inmediatas y apropiadas. Para comenzar con la planificación de respuestas frente a la contaminación por hidrocarburo, es de importancia conocer la trayectoria del contaminante en la superficie del mar, las características del área costera amenazada, los recursos que en dicho ecosistema se encuentren y conocer la influencia de diversas variables ambientales, tales como el viento, el oleaje, las mareas y las corrientes. Por lo tanto, resulta fundamental que los organismos responsables de las aplicaciones de estas medidas posean información al momento de utilizar de un modo óptimo los elementos humanos y materiales disponibles para hacer frente a tal contingencia, especialmente, frente a situaciones que imposibiliten proteger toda la costa.

Se han desarrollado diversos modelos computacionales, cuya complejidad varía desde la posibilidad de hacer poco más que una suma vectorial hasta la tarea de incorporar datos oceanográficos relacionando una descripción completa de las líneas costeras pertinentes, algunas características del hidrocarburos y las transformaciones de los hidrocarburos derramados¹. Los principales fenómenos que son considerados en los modelos son el escurrimiento, la evaporación, la dispersión vertical, la disolución, la emulsificación, la interacción con la costa y la sedimentación de partículas insolubles.

¹ Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Chile). 1994. Manual sobre la contaminación ocasionada por hidrocarburos. Parte II: Planificación para Contingencias, 63 pp. DGTM y MM, Valparaíso.

La mayoría de los modelos se han elaborado en dos dimensiones y solo unos cuantos se encuentran disponibles en tres dimensiones². El énfasis en muchos de estos modelos es la predicción del comportamiento de los vientos, los cuales en la mayoría de los casos determinan la trayectoria final. En una escala mayor la predicción exacta del movimiento de una mancha depende de que se disponga de datos fiables, lo que no siempre es posible. Por esta razón es aconsejable realizar una vigilancia aérea para seguir el movimiento real de la mancha.

Dentro de la gama de modelos existentes se encuentra el denominado OILMAP, software que permite simular derrames de hidrocarburos en el mar prediciendo con ello el desplazamiento de una mancha de petróleo, modelando matemáticamente su trayectoria sobre una base de datos ambientales tales como vientos, corrientes, mareas y sobre las características físicas y químicas del elemento derramado, permitiendo con ello establecer una programación óptima de las acciones de respuesta, principalmente en lo relativo a los procesos de retención, recuperación, dispersión y limpieza.

Otro modelo utilizado es el GNOME (*General NOAA Oil Modeling Environment*) en el cual la trayectoria de productos derramados es estimada a través de información de condiciones de viento, régimen de circulación, volumen y tipo de producto derramado. Utiliza un coeficiente de dispersión para simular los procesos de dispersión turbulenta. El programa calcula la trayectoria de un determinado número de partículas y el proceso dispersivo. Este modelo permite obtener o calcular las incertezas asociadas a observaciones previstas por corrientes y vientos. Utiliza algoritmos simples para simular el envejecimiento o consecuente disminución en la concentración en el medio.

El programa RMA4 es un modelo bidimensional de calidad de agua basado en el método de elementos finitos. Este programa fue desarrollado por el *US Army Corps of Engineers*³, el cual permite calcular la concentración de un máximo de 6 constituyentes, que pueden ser o no conservativos. Se trata de un modelo euleriano que resuelve numéricamente las ecuaciones de conservación de masa para cada uno de los constituyentes considerados. El modelo RMA4 simula los procesos de advección y difusión, considerando una distribución vertical uniforme en el ambiente acuático. Para la aplicación de este modelo, utiliza las soluciones hidrodinámicas calculadas por el programa RMA2.

En el presente trabajo se propone utilizar los modelos hidrodinámico RMA2 y de calidad de agua RMA4 aplicados en la Bahía de Quintero caracterizando el proceso físico de dispersión que afecta el transporte o movimiento del petróleo en el mar, permitiendo evaluar sus ventajas y/o inconvenientes.

1.7 COMPORTAMIENTO DE LOS HIDROCARBUROS EN EL MAR

Cuando los hidrocarburos se derraman en el mar, estos sufren varios cambios físicos y químicos. Algunos de estos cambios producen que los hidrocarburos desaparezcan de la superficie del mar mientras que otros aumentan su persistencia. Aunque el medio marino consiga finalmente asimilar parte de los hidrocarburos derramados, el tiempo que tarde este hecho en producirse depende de sus características físico-químicas y de los procesos naturales de “meteorización” que pueden tener lugar.

² Sorial G, Smith F, Suidan M, Pandit A, Biswas P, Brenner R. 1997. Evaluation of trickle bed air biofilter performance for BTEX removal. *ASCE Journal of Environmental Engineering*. Junio 1997 No. 6: 530.

³ WES-HL (2000) *Users Guide To RMA4 WES Version 4.5*, US Army Corps of Engineers -Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA.

Una vez producido el vertido de hidrocarburo, este tenderá teóricamente a extenderse sobre la superficie formando una delgada capa, aunque esto dependerá de la acción conjunta de una serie de factores ambientales como la velocidad del viento, el tamaño de las olas, la temperatura del agua, la salinidad, las corrientes y la profundidad de la zona. Igualmente, va a depender de la naturaleza del tipo de hidrocarburo, grado de refinación y de la cantidad de hidrocarburo derramado.

1.7.1 TIPOS DE HIDROCARBUROS

El manual sobre la contaminación ocasionada por hidrocarburos. Parte II: Planificación para Contingencias, describe los tipos de hidrocarburos, los cuales se detallan a continuación.

- **Crudos:** Los crudos son mezclas complejas de hidrocarburos con pesos y estructuras moleculares diversos que comprenden tres grupos químicos principales: parafínico, nafténico y aromático. Estos hidrocarburos van desde sustancias simples altamente volátiles hasta ceras complejas y compuestos asfálticos que no pueden ser destilados. Pueden combinarse con oxígeno, nitrógeno, azufre, vanadio, níquel, sales minerales, etc. en distintas proporciones.

A menudo las denominaciones de los crudos se derivan o asocian con su origen geográfico, por ejemplo: crudo de las colinas del norte de Alaska. Cada crudo posee propiedades físico-químicas singulares que pueden variar tanto entre hidrocarburos de la misma zona como entre distintas regiones del mundo.

Los crudos más ligeros y más volátiles tienden a ser altamente fluidos y se extienden con rapidez además de desprender un fuerte olor, tener una elevada tasa de evaporación y ser normalmente inflamables. Penetran en los substratos porosos pero no tienden a adherirse a las superficies duras. Pueden resultar altamente tóxicos para la vida humana, para los peces y demás biota. Los crudos más pesados y menos volátiles poseen una diversidad de características que dependen de sus propiedades específicas.

- **Productos petrolíferos:** Los productos derivados de la refinación de los crudos poseen unas características físico-químicas que dependen de la naturaleza de los crudos y de los distintos procesos a los que hayan sido sometidos. Por lo general, muchos productos refinados tienden a poseer características bien definidas y predecibles ya que la gasolina y el petróleo contienen compuestos similares de hidrocarburos dentro de una banda ajustada de temperaturas de destilación. Sin embargo, los *fuel oils* residuales, tales como los intermedios, medios y los pesados, son más diversos. También pueden añadirse los residuos céreos procedentes de la limpieza de tanques de almacenamiento de crudo a los residuos procedentes de refinación de crudo. Dichos residuos se mezclan entonces con *fuel oils* ligeros derivados para satisfacer las especificaciones relativas a viscosidad y punta de inflamación. Las características de ciertos *fuel oils* intermedios o pesados dependerán del crudo o los crudos a partir de los cuales derive el residuo así como de la naturaleza de cualquier hidrocarburo u otros derivados con los que se han mezclado para cumplir una prescripción concreta de actuación.

Se suelen utilizar varias denominaciones para describir los distintos *fuel oils*. Se pueden denominar: Bunker A, B, C; *fuel oil* número 2, 4, 5, 6; *fuel oil* intermedio (IFO 180); o *fuel oil* pesado (IFO 380). Existe una relación equivalente entre las escala de Bunker A-C y la escala de *fuel oil* ASTM como se puede observar en Tabla 1-1. La escala IFO especifica la

viscosidad de los hidrocarburos en centistokes⁴ (que aproximadamente equivalen a mPAs) a 50 °C.

Tabla 1-1: Escala bunker, números de fuel oil (FO) ASTM y número IFO.

Ejemplos	Escala Bunker	Núm. FO ASTM	Núm. IFO
Fueles ligeros, gasóleo, combustible para calefacción doméstica	A	2	
Gasóleo, fuel ligero para máquinas navales	B	4	60
Gasóleo pesado, <i>fuel oil</i> intermedio	B	5	180
<i>Fuel oil</i> pesado para maquinas navales y quemadores industriales	C	6	380

Fuente: Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Chile). 1994. Manual sobre la contaminación ocasionada por hidrocarburos. Parte II: Planificación para Contingencias, 63 pp. DGTM y MM, Valparaíso.

- **Hidrocarburos persistentes:** Se utiliza el término persistente para describir a aquellos hidrocarburos que, cuando han sido derramados en el medio marino, suelen disiparse lentamente de forma natural debido a su composición química y que, por lo tanto, es probable que se extiendan y que requieran labores de limpieza. Los hidrocarburos que no son persistentes tienden a evaporarse con rapidez cuando se derraman y por lo general no precisan una limpieza profunda.

Aunque en los convenios y normas internacionales no se defina con precisión el término persistente, dentro de los hidrocarburos que normalmente reciben el calificativo de persistente se incluyen a los crudos, los *fuel oils*, los gasóleos pesados y los aceites lubricantes. Con relación a las respuestas a los derrames, este término resulta de utilidad como indicación inicial que permita conocer si un tipo de hidrocarburo persistirá cuando haya sido derramado en el medio marino, lo que posiblemente exija una respuesta contundente y de cierta extensión en el tiempo.

1.7.2 PROPIEDADES DE LOS HIDROCARBUROS

Las propiedades físicas son de gran importancia debido a su influencia en el comportamiento del petróleo sobre la superficie del mar y en su rapidez de disipación mediante procesos naturales. Estas propiedades son la gravedad específica, punto de ebullición, viscosidad y el punto de escurrimiento o *Pour Point*, las cuales se describen a continuación. En la Tabla 1-2 se realiza una comparación de características físicas de algunos hidrocarburos.

- **Gravedad específica (densidad relativa):** Se puede definir a esta propiedad de un hidrocarburo como una densidad en relación con el agua pura⁵ lo cual determinará la flotabilidad de los hidrocarburos en el agua. Por lo general, la densidad de los

⁴ Unidad física de la viscosidad cinemática en el Sistema CGS, conocida por Stokes (abreviado S o St), cuyo nombre proviene de George Gabriel Stokes. A veces se expresa en términos de centistokes (cS o cSt). - 1 Stokes = 100 centistokes = 1 cm²/s = 0,0001 m²/s.

⁵ Téngase en cuenta que la densidad relativa es la medida de la densidad del hidrocarburo con relación al agua dulce, cuya densidad es 1 kg/m³.

hidrocarburos se expresa en términos de la función de densidad API de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$API = \frac{141,5}{\text{Densidad relativa}} - 131,5$$

Por regla general, los hidrocarburos que tienen una baja densidad (alta densidad API) suelen tener viscosidades bajas y contienen una gran proporción de componentes volátiles.

- **Punto de ebullición:** La velocidad a la que se evaporan los hidrocarburos depende de su punto de ebullición inicial y de su escala de ebullición. Cuanto menos sean estos valores, la evaporación se producirá con mayor rapidez.
- **Viscosidad:** Propiedad que indica la resistencia a fluir, los hidrocarburos de mayor viscosidad fluyen con dificultad mientras que aquellos que poseen una baja viscosidad resultan sumamente móviles. Los distintos grados de viscosidad disminuyen conforme aumenta la temperatura; de este modo, la temperatura que tenga el agua del mar y la absorción de calor afectarán a la viscosidad aparente de los hidrocarburos derramados.
- **Punto de escurrimiento (*pour point*):** El punto de escurrimiento de los hidrocarburos es la temperatura a la cual los hidrocarburos no fluyen. Este efecto es el resultado de la formación de una estructura interna microcristalina. Si la temperatura ambiente se encuentra por debajo del punto de fluencia, los hidrocarburos se comportarán como sólidos.

Tabla 1-2: Comparación de características físicas de algunos productos derivados de petróleo.

	Peso específico g/cm ³ a 15 °C	API a 15 °C	Viscosidad Pa*s 38 °C	Pour point °C	Punto ebullición °C
Crudo de petróleo	0,8 a 0,9	5 a 40	2 a 100	-35 a 10	30 a 500
Gasolinas	0,65 a 0,75	60	0,4 a 1	-	30 a 200
Querosenos	0,8	50	0,85	-	160 a 290
Fuel de avión	0,8	48	0,85	-40	160 a 290
Fuel-oil N° 2 (hornos, motores, diesel, estufas)	0,85	30	1,5	-20	180 a 360
Fuel-oil N° 4 (central térmica)	0,9	25	5	-10	180 a 360
Fuel-oil N°5 (bunker B)	0,95	12	10	-5	180 a 360
Fuel-oil N°6 (bunker C)	0,98	10	30 a 300	+2	180 a 360

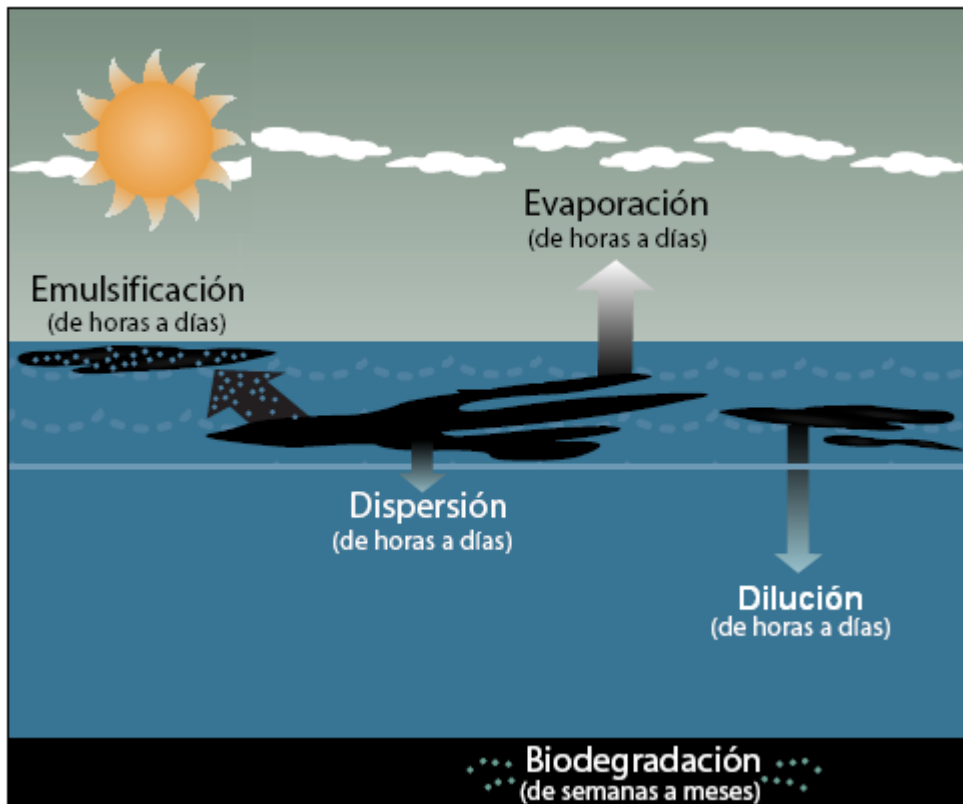
Fuente: Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Chile). 1994. Manual sobre la contaminación ocasionada por hidrocarburos. Parte II: Planificación para Contingencias, 63 pp. DGTM y MM, Valparaíso.

1.7.3 PROCESOS NATURALES QUE ACTÚAN SOBRE LOS HIDROCARBUROS

El transporte del petróleo se estudia a través de las corrientes y el viento. Respecto al primer mecanismo, la turbulencia oceánica va a transportar el petróleo de forma difusiva, mientras que el campo de velocidades medias dará lugar a un transporte advectivo de petróleo. El segundo mecanismo da cuenta de la acción de arrastre sobre la mancha, que como se verá, da lugar a la expansión de la misma, y su contribución está implícita a la hora de calcular el campo de velocidades.

Los procesos de escurrimiento, evaporación, dispersión, emulsificación y disolución son muy importantes en las primeras etapas del derrame, mientras que la oxidación – reducción, sedimentación y degradación son más importantes en etapas posteriores. Para comprender su interacción con el contaminante derramado es necesario conocer su relación con las condiciones ambientales. Todos estos procesos se esquematizan en la Figura 1-3 y se describen en detalle en la Tabla 1-3.

Figura 1-3: Esquema del proceso intemperización del hidrocarburo derramado en el mar.



Fuente: NOAA. 2001. *Manual de Análisis de Trayectoria [en línea]*. Seattle: Administración Nacional de Océanos y Atmosfera NOAA [fecha de consulta: 03/05/2009]. Disponible en: http://response.restoration.noaa.gov/book_shelf/937_trayect.pdf.

Tabla 1-3: Procesos de envejecimiento y escalas de tiempo para respuestas de emergencia.

Proceso de envejecimiento	¿Qué es?	¿Por qué es importante?	Escalas temporales
Evaporación	Conversión de una fase líquida a gaseosa. Las fracciones ligeras del petróleo son las primeras en perderse. La cantidad evaporada depende principalmente de las propiedades del petróleo, del viento y de la temperatura del agua.	Principal causa de la desaparición del petróleo, especialmente para los petróleos ligeros. Por ejemplo, en un intervalo de dos días a 15°C se evaporarán el 100% de las gasolinas, el 80% de los combustibles Diesel, el 40% de los petróleos ligeros, el 20% de los petróleos pesados y sólo del 5 a 10% de Bunker C.	< 5 días
Emulsificación	Diminutas gotas de agua que se mezclan con el petróleo. El contenido en agua a menudo llega al 50 – 80%. Tiene lugar sobre agua y necesita un cierto grado de energía.	Incrementa la cantidad de contaminante a recuperar en un factor de 2 a 4. Hace más lentos los otros procesos de mezcla.	Su inicio se puede retrasar durante días, pero una vez comienza, el proceso de emulsificación se desarrolla rápidamente.
Dispersión	Disgregación de una mancha de petróleo en pequeñas gotas que se dispersan en el agua debido a la energía del mar.	La mayoría de los componentes solubles en agua del petróleo son tóxicos.	< 5 días
Biodegradación	Degradación del petróleo por microorganismos generando compuestos más sencillos y finalmente agua y dióxido de carbono.	La velocidad depende del tipo de petróleo, temperatura, nutrientes, oxígeno y cantidad de petróleo.	Semanas a meses
Dilución	Mezcla de los componentes solubles en agua del petróleo con el agua del mar.	La mayoría de los componentes solubles en agua del petróleo son tóxicos.	<5 días

Fuente: NOAA. 2001. *Manual de Análisis de Trayectoria [en línea]*. Seattle: Administración Nacional de Océanos y Atmosfera NOAA [fecha de consulta: 03/05/2009]. Disponible en: http://response.restoration.noaa.gov/book_shelf/937_trayect.pdf.

1.7.4 EXTENSIÓN Y MOVIMIENTO DE LA MANCHA DE PETRÓLEO

- **Extensión:** El primer fenómeno observable, después de que el derrame se ha producido, es su tendencia a ampliarse formando una mancha sobre la superficie del agua. Las únicas excepciones a esta regla son algunos petróleos y *fuel-oil* pesados y residuales que tienen una densidad mayor a 1000 kg/m³, y aceites que, teniendo un punto de vertido mayor que la temperatura del agua, tienden a solidificarse rápidamente formando en algunas ocasiones verdaderas tortas de alquitrán. La extensión horizontal del petróleo sobre la superficie del agua ocurriría aun en ausencia completa de viento y de corrientes de marea, causada por acción de la fuerza de la gravedad y las tensiones superficiales del agua y del petróleo. Con el paso del tiempo, la mancha se extiende en una capa cada vez más

delgada, y la fuerza de la gravedad, va teniendo un papel cada vez menor en la permanencia del proceso de extensión.

Una posterior extensión de la mancha no estará influenciada por la acción de la gravedad sobre la ya delgada película de hidrocarburo, sino más bien por las diferencias entre las tensiones superficiales del agua y del petróleo. La tensión superficial es la fuerza dominante que influye en la extensión de la mancha en ausencia de fuerzas externas, tales como vientos y corrientes.

El coeficiente de propagación de petróleo en agua o coeficiente de tensión superficial, define la influencia de la tensión superficial en la extensión de la mancha. Este coeficiente se define por:

$$F = \sigma_w - \sigma_0 - \sigma_{\%w}$$

Donde:

- F : Coeficiente de propagación de petróleo en agua, N/m.
- σ_w : Tensión superficial de la fase acuosa, N/m.
- σ_0 : Tensión superficial del petróleo, N/m.
- $\sigma_{\%w}$: Tensión superficial del petróleo, N/m.

Las principales fuerzas que retardan o limitan el proceso de extensión, son la viscosidad y la inercia del petróleo. La influencia retardante de la viscosidad del petróleo puede ralentizar la extensión de la mancha de petróleo aproximadamente una hora después de ocurrido el derrame. La mancha de petróleo se extiende de forma rápida e inmediatamente después de que el derrame tiene lugar. Durante este período inicial de extensión, cuando la fuerza de la gravedad tiene un importante papel, la velocidad de extensión tiende a ser una función del volumen de petróleo derramado, extendiéndose los grandes derrames más rápidamente que los pequeños. En las horas siguientes, la mayor fuerza impulsora llega a ser la tensión superficial; la velocidad de extensión disminuye, por lo que volumen del derrame tiene un efecto menor sobre dicha velocidad de extensión. El petróleo derramado en el agua formará una delgada capa donde las porciones más al interior de la mancha son más gruesas que las de las orillas.

- **Movimiento de la mancha de hidrocarburo:** Los sucesos relacionados con los derrames de hidrocarburos tienen ciertas características generales en los movimientos de las manchas sobre la superficie del mar, siendo las corrientes y el viento los factores que gobiernan su movimiento.

Tal como ya se indicó, la velocidad a la que se desplace la mancha de hidrocarburos se debe a la influencia del viento, dependiendo de su intensidad y del espesor de la mancha de hidrocarburos, pero, habitualmente en aguas abiertas, se moverá aproximadamente a un 3% de la velocidad del viento medido a 10 metros por encima de la superficie del agua. Si el viento es apenas perceptible, lo que rara vez sucede, los hidrocarburos se desplazarán únicamente bajo la influencia de las corrientes o de las mareas (100%). La intensidad y la dirección de las corrientes de mareas influirán a corto plazo en el movimiento de la mancha. Sin embargo, las corrientes de marea rara vez se anulan por completo de forma recíproca, lo que producirá una corriente residual que será la que determine el movimiento a largo plazo de la mancha de hidrocarburos.

Cuando los vientos y corrientes son significativos, sus efectos son aditivos, si bien tanto las direcciones como las magnitudes de las velocidades deben ser consideradas como la

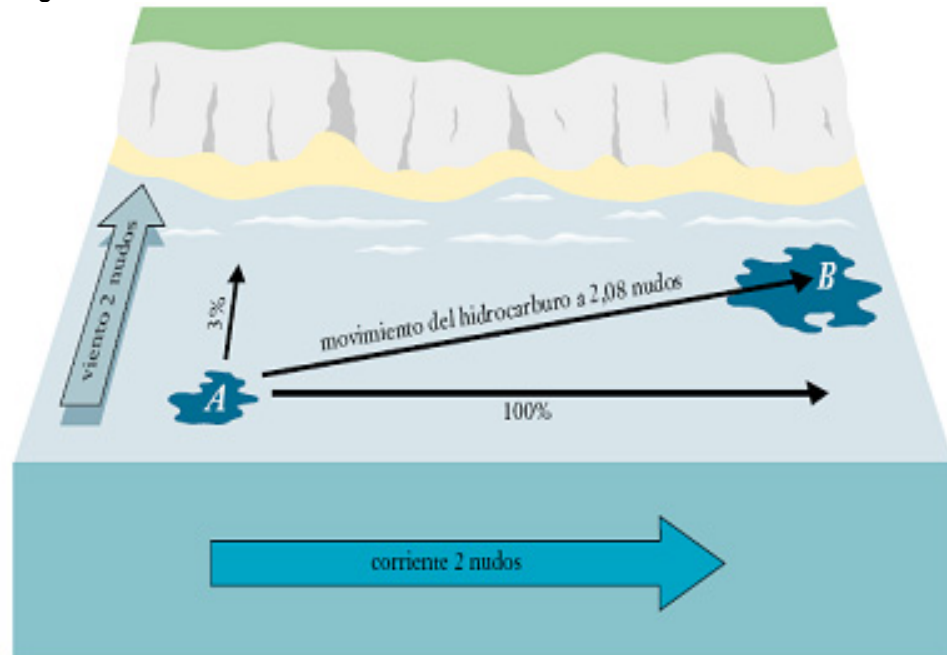
suma vectorial de la velocidad del viento y de las corrientes de mareas, de esta forma se determina el movimiento de una mancha sobre la superficie, permitiendo trazar un diagrama vectorial. Este diagrama puede representarse mediante la siguiente fórmula simplificada (Figura 1-4):

$$V_{\text{hidrocarburo}} = V_{\text{corriente}} + (V_{\text{viento}} \times Q)$$

Donde:

- $V_{\text{corriente}}$: Velocidad de la corriente.
- V_{viento} : Velocidad del viento a una altura de 10 m.
- $V_{\text{hidrocarburo}}$: Velocidad del hidrocarburo.
- Q : Factor de velocidad del viento del 3%.

Figura 1-4: Influencia de la velocidad del viento con la velocidad de la corriente.

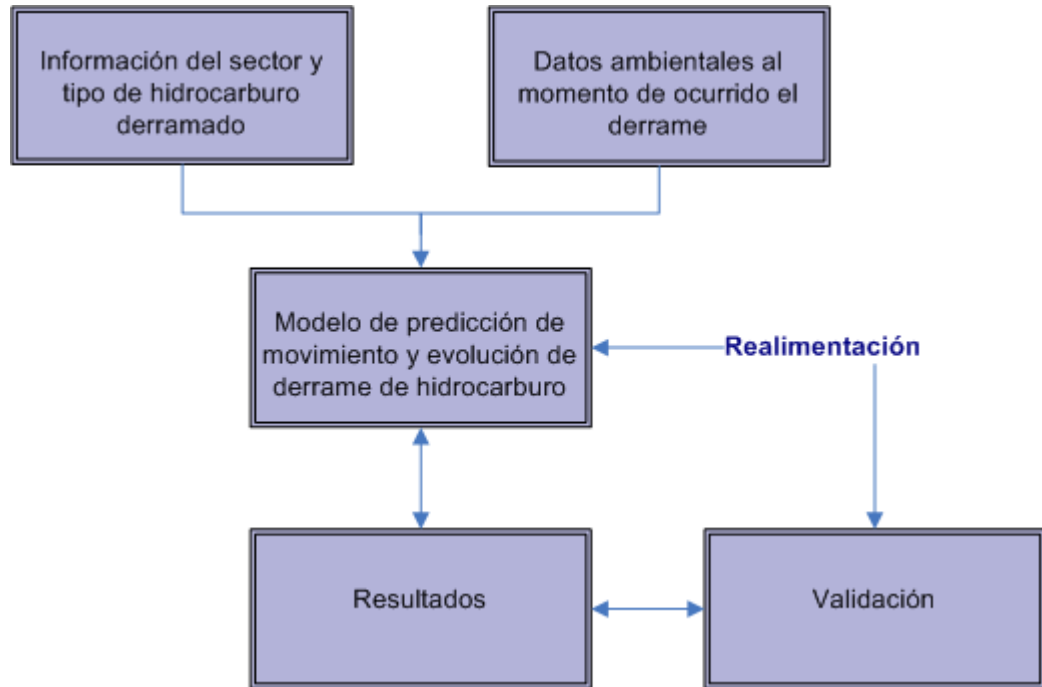


Fuente: Evans, L. Davidson, Margaret A. Vice Admiral Conrad C. Lautenbacher. Jr. *Manual de Análisis de Trayectoria*. Servicio Nacional Oceánico. Oficina de Respuestas y Restauración. División de Respuesta a Materiales Peligrosos. Administración Nacional de Océanos y Atmosfera (NOAA). 25 pp.

Por lo anterior, para realizar una simulación lo más realista posible, el modelador debe estudiar los datos e intentar comprender los procesos físico-químicos que afectarán al movimiento y evolución de ese derrame en particular; además de seguir un esquema como el presentado en Figura 1-5. El modelador con una comprensión de los procesos físicos puede proporcionar a la Autoridad Marítima un análisis como previsión ante la ocurrencia de un derrame de hidrocarburo. Si la previsión inicial es inexacta, lo que puede suceder debido a información errónea sobre el derrame (por ejemplo, localización y cantidad de petróleo vertido), datos ambientales erróneos (por ejemplo, previsión meteorológica) y las limitaciones propias del modelo; entonces el modelador debe refinar el modelo hasta que este se asemeje a la realidad. En general, en la medida que progresa el derrame, la

previsión sobre el movimiento y la evolución del derrame se hace más precisa puesto que la calidad y la cantidad de los datos observados también mejoran (al tiempo que los datos sobre el derrame inicial se vuelven relativamente menos importantes).

Figura 1-5: Diagrama de información necesaria para modelación de derrame de hidrocarburos.



Fuente: Evans, L. Davidson, Margaret A. Vice Admiral Conrad C. Lautenbacher, Jr. *Manual de Análisis de Trayectoria. Servicio Nacional Oceánico. Oficina de Respuestas y Restauración. División de Respuesta a Materiales Peligrosos. Administración Nacional de Océanos y Atmosfera (NOAA). 25 pp.*

La hidrodinámica marina depende de un conjunto de fenómenos físicos que resultan en patrones complejos de circulación responsables del transporte de hidrocarburos derramados en el mar. Los principales fenómenos responsables se detallan a continuación:

- **Corrientes:** La corriente superficial es el principal mecanismo de transporte del petróleo. El régimen de corrientes presentes al producirse el derrame será un factor importante para determinar la extensión y evolución del derrame.
- **Difusión turbulenta:** En el documento escrito por Olaso S. 2008. Análisis de la expansión de manchas de vertidos de crudo en el mar. Tesis para optar el Título de Ingeniero en Minas. Departamento de Ingeniería Química y Combustibles. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid; indica que el petróleo derramado en el agua está sujeto a regímenes de flujo turbulento. La turbulencia oceánica se genera a causa de vientos y corrientes, así como por el calentamiento y enfriamiento. El flujo en las capas superiores del agua se vuelve más turbulento a medida que aumenta el viento y las corrientes.

La difusión turbulenta, causada por movimientos aleatorios de masas de agua, rompe las manchas de petróleo en parcelas más pequeñas que se distribuyen por un área más extensa. La difusión del petróleo tiene lugar principalmente en la dirección horizontal,

siendo mucha mayor que la difusión vertical. La difusión horizontal en la superficie del agua varía de 0,01 a 10 m²/s (dependiendo del área inicial del vertido).

1.7.5 CLASIFICACIÓN DE LOS DERRAMES DE PETRÓLEO

Los derrames de petróleo se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a su volumen inicial, los cuales se clasifican en derrames local, medianos y mayores, de acuerdo a clasificación realizada por Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Chile). 2007 ORDINARIO N°12600/184 VRS: aprueba Circular de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante, Ordinario N° A 53/001, Valparaíso, 09 de Marzo de 2007. DGTMA y MM, Valparaíso. La ocurrencia de un derrame menor podría activar un plan local de contingencia. Un derrame mediano, según las circunstancias, podría justificar la activación de un plan local o un plan zonal. Finalmente, cuando el derrame es mayor, se podrá activar el Plan Nacional de Contingencia. Para clarificar esta terminología se sugieren las siguientes definiciones:

- **Derrame local** : Se refiere a un derrame no mayor de unos pocos metros cúbicos, que está dentro de la capacidad de respuesta local (empresa petrolera, terminal marítimo, autoridad portuaria, etc.), no implica un alto riesgo de incendio o explosión y que no ocurre en un área crítica en cuyo caso pasa a la categoría de mediano por el esfuerzo que implica su origen; puede ser de diversos tipos: pérdidas o rupturas en juntas de tuberías, flexibles o mangueras; escurrimientos desde plataformas petroleras; o descargas de lastres sucios.
- **Derrame mediano** : Se trata de un derrame no mayor de 100 m³, que supera la capacidad local para enfrentarlo pero que podría ser controlado mediante los recursos disponibles en la zona, generalmente como un esfuerzo combinado de varias instituciones o compañías. También, puede ser un derrame menor, pero con ciertas complicaciones. Su origen puede ser cualquier incidente marítimo o costero, entre ellos, pérdidas en oleoductos; pérdidas en monoboyas, o un desbordamiento o accidente menor en un buque tanque, barcaza o gabarra petrolera.
- **Derrame mayor** : Se trata de un derrame de daños potenciales graves. Puede ser un derrame mediano, que por diversos factores se convierte en una amenaza seria o, un derrame volumétricamente importante, mayor de 100 m³. Algunos factores que aumentan la gravedad del derrame pueden ser: la alta toxicidad del hidrocarburo derramado, riesgo de incendio, afecta a un área crítica, ocurre dentro de un área portuaria o canal de intensa navegación, etc. Su origen puede ser cualquier incidente marítimo mayor, como por ejemplo: colisión entre buques tanque, encallamiento de un buque tanque, o un reventón o descontrol de un pozo petrolero submarino.

Es importante señalar que los límites volumétricos que puedan elegirse en este tipo de definiciones son arbitrarios y, no debieran ser los únicos indicadores considerados en una definición, ya que los otros elementos del escenario del derrame podrían ser tantos o más decisivos.

2 DESCRIPCIÓN DE MODELOS RMA2 Y RMA4

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan las ecuaciones de continuidad y de movimiento que rigen el movimiento de las masas de agua del medio ambiente acuático a través de modelo hidrodinámico RMA2, cuyo resultado posteriormente será utilizado en la ecuación de advección-dispersión del modelo de calidad de agua RMA4, aplicados a derrames de hidrocarburos.

2.2 MODELO HIDRODINÁMICO RMA2

El modelo RMA2 utiliza el método de elementos finitos para resolver un sistema de ecuaciones que describen las condiciones hidrodinámicas de un área determinada definida a través de una malla de elementos finitos, obteniéndose como resultado las velocidades medias del flujo y los niveles de agua. El modelo RMA2 calcula las elevaciones de la superficie del agua y las componentes horizontales de la velocidad para escurrimientos subcríticos a superficie libre teniendo en cuenta dos campos dimensionales del flujo.

Las soluciones están basadas en el desarrollo de las ecuaciones de Navier –Stokes para movimiento turbulento teniendo en cuenta los números de Reynolds. La fricción se calcula o bien utilizando la ecuación de Manning o bien la ecuación de Chezy y los coeficientes de viscosidad turbulenta se utilizan para definir las características en cuanto a la turbulencia de la corriente. Pueden ser analizados problemas a régimen permanente o impermanente.

El programa ha sido aplicado para calcular niveles de agua y distribución de caudal en la periferia de islas, caudales en puentes con uno o más vanos, en rías y estuarios, aguas arriba y aguas debajo de canales de centrales hidroeléctricas, canales de plantas de bombeo, circulación y transporte en cuerpos de agua y zonas costeras, embalses, etc.

RMA2 tiene las siguientes características:

- Identifica y permite corregir errores en la implementación de la malla de elementos finitos.
- Permite reiniciar (hotstart) una simulación desde una corrida previa del RMA2 y continuar con la misma.
- Permite tener en cuenta los efectos de rotación de la tierra (aceleración de Coriolis).
- Permite aplicar las tensiones originadas por el viento.
- Permite usar alternativamente distintos coeficientes de intercambio turbulento, valores del n de Manning, temperatura, etc.
 - Utilizar ecuaciones que asignan automáticamente en forma dinámica valores de n de Manning de acuerdo a la profundidad de cada nodo de la malla.
 - Utilizar el número de Peclet para asignar automáticamente en forma dinámica los coeficientes de intercambio turbulento en cada nodo de la malla.
- Permite modelar incluso hasta con 5 diferentes tipo de estructuras de control de flujo.
- Permite calcular el caudal que atraviesa línea de continuidad preseleccionadas.
- Permite considerar los efectos de corrientes secundarias en curvas.
- Permite simular el secado y vuelta a inundar de sectores del área modelada en función de las variaciones de nivel sin necesidad de generar una nueva grilla de elementos finitos.
- Acepta una gran variedad de condiciones de borde:
 - Magnitud de los ángulos/velocidades por nodos.
 - Componentes de velocidad por nodos.
 - Elevación de la superficie libre del agua por nodos/líneas.
 - Descarga por nodos/elementos/líneas.

- Niveles de mareas impermanentes por líneas.
- Descarga como función de la altura del pelo de agua por líneas.
- Velocidad del viento y dirección por nodos/elementos o tipos del material de cada elemento.

Las limitaciones que posee el RMA2 son las siguientes:

- Opera asumiendo condiciones hidrostáticas.
- Las principales aceleraciones en la dirección vertical son despreciables.
- Es bidimensional en el plano horizontal.
- No es recomendable utilizarlo para resolver problemas donde los vórtices, vibraciones o aceleraciones verticales sean de principal importancia. En el presente caso de estudio, estas limitaciones no resultan de importancia.

El modelo general RMA2 integra en profundidad las ecuaciones integrales de flujo de masa y conservación del momento en dos direcciones horizontales.

La ecuación que general del modelo se presenta a continuación.

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g \rho n^2}{R^{1/3}} (u^2 + v^2) - \dots$$

$$\dots - \tau_x - v 2\Omega \sin \varphi = 0$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g \rho n^2}{R^{1/3}} (u^2 + v^2) - \dots$$

$$\dots - \tau_y + u 2\Omega \sin \varphi = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

Donde:

- h : Profundidad, m.
- u, v : Velocidades en dirección x e y, m/s.
- x, y, t : Coordenadas cartesianas y tiempo, m y horas respectivamente.
- ρ : Densidad del fluido, kg/m³.
- E_x, E_y : Coeficiente de viscosidad de remolino, kg-seg⁻¹/m.
- g : Aceleración de gravedad, m/s².
- a : Elevación del fondo, m.
- n : Coeficiente de rugosidad de Manning.
- τ_x, τ_y : Fricción del viento, m/s.
- φ : Latitud en coordenadas geográficas.

Descripción de términos:

- 1º término : Aceleración local.
- 2º término : Aceleración advectiva para el eje x
- 3º término : Aceleración advectiva para el eje y
- 4º término : Dispersión x e y.
- 5º término : Elevación superficial.

- 6° término : Fricción en el fondo.
 7° término : Tensión superficial
 8° término : Aceleración de coriolis

Se observa que las ecuaciones de movimiento y continuidad se desprecian el término de velocidad en la vertical w , debido que es muy pequeña, aparte de que en la zona costera las ondas se generan normalmente por ondas cuya longitud es mucho mayor que la profundidad del agua como es el caso de la onda de marea. La condición de onda larga se considera aplicable a partir de $L > 20h$. En algunas situaciones se considera directamente $w = 0$. Asimismo se asume que el movimiento que se estudia presenta una distribución de las velocidades u, v uniforme en la vertical, estableciendo la hipótesis en los casos en que las corrientes marinas son generadas por marea, ya que el perfil es prácticamente uniforme.

De la ecuación de movimiento se desprecia el término de la fuerza de Coriolis, correspondiente a $2\Omega \sin(\varphi)$, $\Omega = 0,73 \cdot 10^{-4}$ rad/día, que es la velocidad angular de la rotación de la tierra y $\varphi = 32^\circ$ es la latitud media del dominio del modelo para la Bahía de Quintero, siendo la fuerza de Coriolis $f = 7,74 \cdot 10^{-5}$ rad/día, el cual es muy pequeño y puede ser despreciado de la ecuación de movimiento del modelo RMA2. Por lo que la ecuación de movimiento del modelo hidrodinámico RMA2, a ser aplicado en el presente trabajo es:

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g u n^2}{R^{3/8}} (u^2 + v^2) - \tau_x = 0$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g v n^2}{R^{3/8}} (u^2 + v^2) - \tau_y = 0$$

2.2.1 CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO

Las condiciones iniciales del modelo hidrodinámico RMA2, son la sobrelevación del agua, para simular el movimiento periódico, como es el caso que se analizará en el presente estudio a través de una señal de marea, una solución estable se obtiene después de varios ciclos.

Las ecuaciones de continuidad y movimiento deben ser completadas con condiciones apropiadas de contorno. Desde un punto de vista físico se hace necesario definir las siguientes condiciones de contorno:

- En la línea de costa.
- En la superficie libre.
- En el fondo.
- En el mar abierto.

2.2.1.1 LÍNEA DE COSTA

En la línea de costa se asume que la componente de la velocidad normal a la línea de costa es nula, mientras que la componente tangencial no se le impone ninguna condición.

2.2.1.2 SUPERFICIE LIBRE

Las tensiones tangenciales en la superficie libre normalmente son generadas por el viento. RMA2 posee diversas opciones para formulaciones del estrés del viento siendo, el cual es extremadamente alejado de la realidad para implementar en un modelo bidimensional.

La aplicación de la fricción del viento es un proceso de dos pasos:

- Especificar la formulación de control del viento.
- Especificar la intensidad y dirección del viento.

2.2.1.3 FRICCIÓN EN EL FONDO

La rugosidad del fondo marino⁶ es una de las primeras especificaciones implementadas al modelo RMA2. La selección de la fricción del fondo provee un control sobre la magnitud y dirección de la velocidad del fluido.

$$\tau = \rho g R S$$

Donde:

- τ : Tensión en el fondo por fricción, kg/ms².
- ρ : Densidad del agua, kg/m³.
- g : Aceleración de gravedad m/s².
- R : Radio hidráulico, m.
- S : Pendiente del fondo.

La fricción del fondo es calculada con la ecuación de Manning's, en donde se ingresa con un valor de rugosidad <3,0, otras veces es utilizada la ecuación de Chezy. Por ahora, la opción más popular son los valores de Manning's, y estos valores de rugosidad pueden ser asignados en toda el material del dominio, o en un nivel elemental.

La ecuación de Manning's para flujo uniforme, en unidades SI, se escribe como:

$$V = \frac{1,00}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

Donde:

- V : Velocidad, m/s.
- n : Valor de Manning's.
- 1,00 : Coeficiente empírico.

El término final n es un factor de resistencia, el cual depende de la rugosidad del fondo utilizada previamente. Resolviendo la ecuación de Manning's para S y sustituyendo el resultado dentro de la ecuación de tensión en el fondo por fricción, se obtiene:

$$\frac{\tau}{\rho} = g R \left(\frac{nV}{R^{2/3}} \right)^2$$

⁶ La rugosidad del fondo marino, no sólo está en función de la morfología del suelo marino, la composición sedimentaria es un aspecto importante a considerar, pero no está considerado en los aspectos técnicos del presente trabajo.

El valor de Manning's para diferentes tipos de fondo inicialmente se seleccionaron basados en rangos provistos en el documento Lindeburg MR. 1992. *Civil Engineering Reference Manual*; Civil Engineering Reference Manual for the PEEEXAM, y el valor utilizado para la simulación de una bahía fue de 0,025.

2.2.1.4 COEFICIENTE DE VISCOSIDAD DE REMOLINO

La viscosidad de remolino se define como la transferencia de momentum del fluido debido al movimiento caótico de las partículas del mismo. El modelo RMA2 permite el intercambio del coeficiente especificado con respecto a un sistema de coordenadas local para cada uno de los elementos. Aunque es difícil establecer un valor para E, análogamente con las condiciones físicas se sugiere que los cambios de viscosidad de remolino dependan de la dinámica del fluido, los gradientes espaciales de la velocidad y la magnitud de las corrientes. Por lo tanto, a medida que el tamaño del elemento aumenta o cuando la velocidad aumenta, E debe aumentar.

Los resultados numéricamente inestables producen una divergencia del programa, como solución a ello, se recomienda aumentar E, hasta que se logre la solución a este problema.

RMA2 ofrece tres métodos para especificar el coeficiente de remolino, a través de la asignación directa, asignación automática por número de Peclet, y asignación automática por coeficiente Smagorinsky.

La asignación directa, implica asignar el coeficiente de remolino para cada elemento, o grupo de elementos, sobre la base de la longitud de un elemento representativo y la velocidad máxima. La asignación automática por el número de Peclet permite ajustar E, para cada iteración, basándose en el tamaño del elemento y la velocidad calculada. El número de Peclet está dado por:

$$P = \frac{\rho u dx}{E}$$

Donde:

- P : Número de Peclet.
- ρ : Densidad del agua, kg/m³.
- u : Velocidad, m/s.
- dx : Tamaño del elemento característico, m.
- E : Coeficiente de viscosidad de remolino, kg-seg⁻¹/m².

La asignación a través del coeficiente de Smagorinsky, permite ajustar la viscosidad de remolino en tiempo real basada en la velocidad calculada, especialmente relevante para zonas turbulentas, próximo a pequeñas estructuras. La viscosidad turbulenta en términos del coeficiente de Smagorinsky está dado por:

$$E = TBFAC T \cdot A \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]$$

Donde:

- TBFAC T : Coeficiente Smagorinsky.
- A : Área del elemento.
- $\partial u / \partial x$ y $\partial v / \partial y$: Componente de velocidad para cada elemento.
- E : Coeficiente de viscosidad de remolino, kg-seg⁻¹/m².

2.2.1.5 MAR ABIERTO

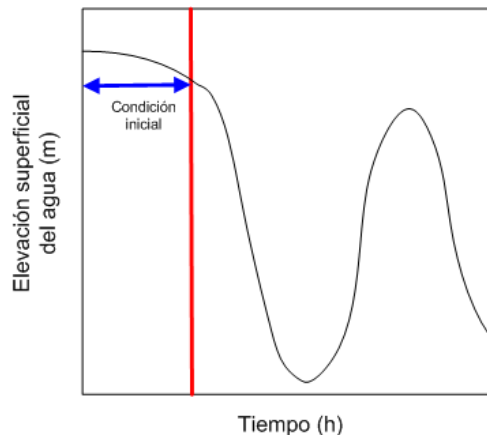
El mar abierto es una línea ficticia que separa el dominio del modelo del resto del mar. Es evidente entonces que para una correcta simulación es necesario conocer las características hidrodinámicas de este contorno, bien en términos de velocidades, como en elevaciones del nivel del mar. Aunque existen distintas teorías para plantear la condición de contorno en el mar abierto, la manera más fiable para obtener resultados correctos es disponer de datos reales.

Los datos de entrada a utilizar en el presente trabajo corresponden a la forzante de marea, la condición de borde debe ser ubicada lo suficientemente lejos de la zona de interés, de modo que la condición de frontera no afecte directamente a los resultados.

Para el movimiento periódico de la marea, es necesario especificar el tipo de inicio (frío o caliente). El inicio del modelo en frío, se le asigna a cada nodo la misma elevación de la superficie del agua y las velocidades en las direcciones x e y se asumen cero; este método es sencillo de utilizar, ya que trata únicamente de asignar en forma inicial el nivel del agua, asegurándose que corresponde a la serie de tiempo. Sin embargo, se requiere que la elevación de la superficie del agua sea lo suficientemente alta para garantizar que todos los nodos de la malla están bajo el agua al comenzar a ejecutar el modelo. Esto generalmente significa que la condición de frontera de series temporales debe ser modificada en forma gradual, bajo rampas artificiales del nivel del agua a partir del nivel de agua inicial hasta un punto en la serie de tiempo. Debe ser gradual para que el modelo converja a una solución. Otra desventaja de este método es que se debe permitir cierto tiempo para estabilizar el modelo y para que la condición inicial artificialmente elevada, disminuya.

La condición inicial puede tomar 10 horas de simulado hasta 45 horas para estabilizar la simulación. La Figura 2-1 es un ejemplo de una condición inicial de rampa bajo, para la condición de borde de serie de tiempo.

Figura 2-1: Ejemplo de condición inicial dinámico como condición de borde.



Fuente: Elaboración Propia.

El inicio en caliente el cual fue aplicado en el presente trabajo implica que la serie de marea aplicada corresponde a los resultados de un modelo anterior, requiriendo más tiempo de tratamiento previo para asegurar que las condiciones iniciales en el registro de inicio en caliente sean las correctas.

2.2.2 DATOS Y RESULTADOS DEL MODELO

Los principales datos del modelo son:

- Elevación del mar como condición de contorno en mar abierto, los cuales son datos empíricos o bien analíticos, correspondientes a la amplitud y período de la marea.
- Fricción por fondo.
- Coeficiente de arrastre por viento.
- Coeficiente de viscosidad del remolino.
- Batimetría, en donde para cada punto de la malla se ha de conocer la profundidad por debajo del nivel medio.

El resultado básico del modelo lo constituyen las elevaciones de la superficie libre y los campos de velocidades.

2.2.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACION DEL MODELO

La calibración del modelo consiste en hacer coincidir los resultados del este con una serie de datos obtenidos de medidas *in situ*. Para conseguir esto pueden ser variados:

- Fricción del fondo.
- Coeficiente de viscosidad del remolino.
- Coeficiente de arrastre por viento.
- Condiciones de contorno en mar abierto.
- Batimetría.

Una vez realizada la calibración, la validación del modelo consiste en comprobar la robustez del modelo con un grupo de datos.

- Fricción por fondo: A mayor valor de coeficiente de fricción corresponde menor fricción y mayores velocidades medias.
- Coeficiente de viscosidad de remolino: Es probablemente el más difícil de calibrar, ya que en él se incluyen los efectos “turbulentos” no considerados de otra forma. Con este coeficiente se intenta tener en cuenta también efectos debidos a promedios espaciales, como son:
 - La promediación en vertical de las ecuaciones de cantidad del movimiento.
 - La promediación en horizontal para el tamaño de las celdas de la malla.
 - La dispersión numérica debida a la transformación de las ecuaciones diferenciales en ecuaciones en diferencia finitas.
- Condiciones de contorno en mar abierto es difícil plantear consideraciones de carácter general.
- Batimetría: La batimetría utilizada para el cálculo ha de ser suave, correspondientes mayores de 1:5, ya que, en general, cambios bruscos pueden generar inestabilidades numéricas.

2.3 MODELO DE CALIDAD DE AGUA RMA4

El modelo RMA4 fue diseñado con el propósito de investigar procesos físicos que son responsables en la distribución de contaminantes en el ambiente. RMA4 permite evaluar las concentraciones de un máximo de 6 contaminantes, tanto conservativos como no conservativos⁷. Resuelve numéricamente las ecuaciones de conservación de masa del contaminante. El modelo RMA4 está preparado para simular los procesos advectivos y difusivos, considerando una distribución vertical uniforme en el ambiente acuático.

RMA4 tiene las siguientes características:

- Lee archivos de geometría unidimensional y/o bidimensional, o permite la especificación manual de la geometría.
- Lee resultados hidrodinámicos unidimensional y/o bidimensional del modelo RMA2, o permite la especificación manual del campo de velocidad.
- Permite modelar la precipitación/evaporación especificada en el modelo hidrodinámico RMA2.
- Permite manejar todas las estructuras de control de flujo unidimensional disponibles en el modelo RMA2.
- Permite reiniciar (hotstart) una simulación desde una corrida previa del RMA4 y continuar con la misma.
- Permite calcular concentraciones de condición de límite por nodo, línea o carga de masa.
- Modelar hasta 6 constituyentes sea conservativo o no conservativo usando un decaimiento de primer orden.

Las limitaciones que posee el RMA4 son las siguientes:

- Se limita a situación unidimensional y bidimensional en las que la concentración se encuentra bastante bien mezclada en la dirección vertical.
- No proporciona concentraciones precisas en situaciones estratificadas en que la concentración del contaminante es influida por la densidad del fluido.

A continuación se describirán la ecuación del modelo de calidad de agua aplicado para la simulación de un derrame de hidrocarburo, asumiendo que este contaminante es conservativo. La ecuación de transporte de masa tendrá la siguiente forma:

$$h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial c}{\partial y} - \sigma + kc + \frac{R(c)}{h} \right) = 0$$

Donde:

- h : Profundidad, m.
- u, v : Velocidad en dirección cartesiana, m/s.
- x, y, t : Coordenadas cartesianas y tiempo, m y horas respectivamente.
- c : Concentración de contaminante para cualquier constituyente, kg/m³.

⁷ Contaminantes conservativos: Son aquellos que su estructura química se mantiene a lo largo del tiempo a pesar de su interacción con el medio receptor.

Contaminantes no conservativos: Son aquellos cuya estructura química se modifica al interactuar con el medio o por autodegradación como en el caso de los contaminantes orgánicos o biológicos.

- D_x, D_y : Coeficiente de dispersión, m^2/s .
 k : Decaimiento del contaminante, s^{-1} .
 σ : Fuente/sumidero del contaminante.
 $R(c)$: Tasa de lluvia/evaporación.

Descripción de términos:

- 1° término : Término local.
2° término : Término advectivo
3° término : Término advectivo
4° término : Dispersión x.
5° término : Dispersión y.
6° término : Fuentes locales de la sustancia.
7° término : Decaimiento exponencial.
8° término : Efectos de lluvia/evaporación.

El coeficiente de decaimiento k (séptimo término) no es utilizado en este trabajo, pues dicho coeficiente caracteriza la pérdida del contaminante cuando éste desaparece por medio de algún proceso químico el cual está fuera de los alcances del presente trabajo, por lo que es eliminado de la ecuación general. El término de evaporación y precipitación es eliminado de la ecuación general debido que el proceso a evaluar en el presente trabajo es la dispersión del hidrocarburo derramado en el mar. Por lo tanto la ecuación de conservación de la masa bidimensional, se formula en términos de velocidades y concentraciones instantáneas de la siguiente forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)$$

Para la integración de la ecuación de conservación se utilizan velocidades promediadas en la vertical (como por ejemplo, las contenidas del modelo hidrodinámico bidimensional anteriormente descrito), los coeficientes de difusión horizontal han de tener en cuenta el llamado “shear effect”. Este efecto es debido a que la distribución de la velocidad en vertical no es uniforme lo que origina que en las zonas de mayor velocidad, la sustancia diluida en el fluido se mueva más rápidamente que en las zonas de menor velocidad, de manera que se realiza una importante dispersión de la sustancia que no se tiene en cuenta al utilizar la promediación. Los coeficientes con los que se tiene en cuenta el “shear effect” se denominan normalmente coeficientes de dispersión y suelen ser mucho mayores que los de difusión turbulenta horizontal. Los coeficientes de dispersión han sido estudiados por distintos autores. Entre las fórmulas que se utilizan para obtener estos coeficientes, la más conocida es la fórmula de Elder.

$$D_1 = 5.9U^*h$$

$$U^* = \sqrt{ghS}$$

Donde:

- D_1 : Coeficiente de dispersión en dirección del flujo, m^2/s .
 h : Profundidad, m.
 U^* : Velocidad de fricción, m/s.
 S : Pendiente de la superficie libre.
 g : Aceleración de gravedad, m/s^2 .

Teniendo en cuenta que la velocidad de fricción para aguas costeras suele ser del orden de 6% de la velocidad del flujo, se obtiene la siguiente formulación:

$$D_l = 0.4Uh$$

Sin embargo, la experiencia señala que los coeficientes de dispersión obtenidos en la calibración de los modelos son, en muchas ocasiones mayores que los calculados con la fórmula u otras semejantes. Este fenómeno se puede explicar por el hecho de que la discretización necesaria para resolver numéricamente estos modelos, implica en sí misma una promediación tanto espacial como temporal. Entonces es lógico intentar calcular los coeficientes de dispersión en función de la propia discretización, mediante la siguiente fórmula:

$$D_l = 0.5(|u|\Delta l - \Delta t^2)$$

$$D_l = K_1 \Delta l u \quad \text{con } K_1 = 0.03/0.15$$

$$D_t = K_2 \Delta t u u \quad \text{con } K_2 = 0.07/0.34$$

Donde:

- $D_{l,t}$: Coeficiente de dispersión en dirección del flujo.
- Δl : Tamaño de la celda en dirección del flujo, m.
- u : Velocidad del flujo, m/s.
- Δt : Paso del tiempo utilizado en el cálculo, seg.
- $K_{1,2}$: Coeficientes.

El coeficiente de dispersión perpendicular al flujo D_t , se podría considerar un orden de magnitud menor que D_l . La proyección de los coeficientes de dispersión sobre los ejes x e y se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$D_x = \left[\left(\frac{\cos \alpha}{D_l} \right)^2 + \left(\frac{\sen \alpha}{D_t} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$D_y = \left[\left(\frac{\sen \alpha}{D_l} \right)^2 + \left(\frac{\cos \alpha}{D_t} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Donde:

- $\alpha = \arctan(v/u)$
- u = velocidad en el eje x.
- v = velocidad en el eje y.

2.3.1 CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO

2.3.1.1 CONDICIÓN INICIAL

Surge el problema del cálculo de la concentración del hidrocarburo derramado en el mar para ser implementado en el modelo de calidad de agua, RMA4; en el presente trabajo se asumió que la concentración en la columna de agua pasa a ser independiente de la profundidad local.

En cada elemento de la malla de elementos finitos la concentración puede ser calculada a través de la relación a la masa de hidrocarburo derramado en kg, la cual está dada por:

$$m_o = C \times V_{xy}$$

Donde:

C : Concentración calculada para el modelo, kg/m³.

V_{xy} : Volumen del elemento, m³.

m_o : Masa del hidrocarburo derramado, kg.

Para determinar la masa del hidrocarburo derramado, se aplica la formulación de volumen que relaciona la masa y la densidad del fluido a considerar, la cual está dada por:

$$V_o = \frac{m_o}{\rho_o}$$

Donde:

ρ_o : Densidad del producto derramado, kg/m³.

2.3.1.2 CONDICIÓN DE CONTORNO

Se asume que el transporte de masa en contornos sólidos del modelo es nulo. Además la condición de contorno en mar abierto es difícil de definir con generalidad. En la práctica es habitual elegir el dominio del modelo de tal manera que las concentraciones en el contorno sean previsiblemente nulas.

2.3.2 DATOS Y RESULTADOS DEL MODELO

Los datos de entrada son las concentraciones iniciales, además del campo de velocidades para el dominio del modelo a lo largo de toda la ejecución. Siendo los resultados del modelo de calidad de agua RMA4, las concentraciones del hidrocarburo derramado con extensión temporal y espacial definida por el usuario.

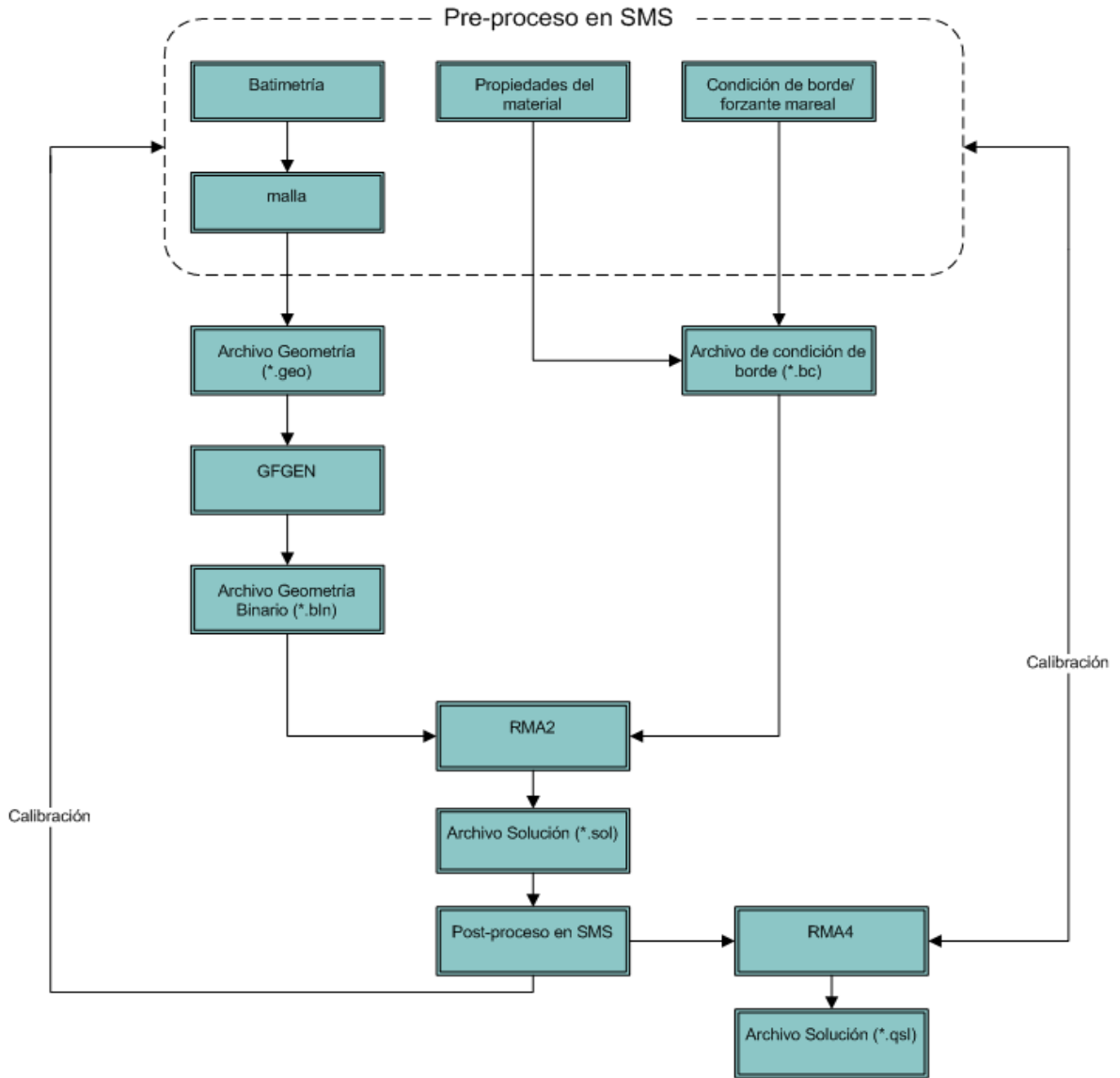
2.3.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Los parametros a calibrar y validar son los coeficientes de dispersión. Estos coeficientes son difíciles tanto de medir como de validar. En el procesos de calibración y validación ha de tenerse en cuenta que los coeficientes de dispersión dependen no solamente de las características del medio, sino también de la discretización espacial y temporal del dominio del modelo.

2.4 PROCESOS DE MODELACIÓN

El método general para el modelamiento hidrodinámico en RMA2 y de calidad de agua en RMA4, se observa en Figura 2-2. Este proceso consiste en la construcción de la malla en el sitio de estudio, la creación de los correspondientes archivos de entrada, ejecución del modelo hidrodinámico y calibración. En un modo iterativo se hacen ajustes a los datos de entrada (malla, propiedades del material, o condiciones de frontera) y el proceso comienza nuevamente. Esto se repite según sea necesario hasta que las predicciones se consideren suficientes de acuerdo al criterio del modelador.

Figura 2-2: Diagrama del proceso de modelación hidrodinámico y de calidad de agua.



Fuente: WES-HL (2000) Users Guide To RMA4 WES Version 4.5, US Army Corps of Engineers -Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA.

3 APLICACIÓN DE LOS MODELOS RMA2 Y RMA4 EN LA BAHÍA DE QUINTERO

3.1 INTRODUCCIÓN

Se ha elegido la Bahía de Quintero para la evaluación del comportamiento de un derrame de petróleo con los modelos RMA2 y RMA4. La elección del sector a realizar el ensayo se realizó a partir de las tasas de transferencia de este material y la disponibilidad de información oceanográfica necesaria para la calibración del modelo.

La presente sección contiene las condiciones de borde y calibración aplicadas a los modelos RMA2 y RMA4. Además se describen las condiciones oceanográficas de la Bahía de Quintero, las cuales fueron obtenidas de mediciones *in situ*, durante el periodo de agosto a septiembre del 2006.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO

La Ilustre Municipalidad de Quintero, el año 2006 desarrollo un “Plan de Desarrollo Comunal de Quintero” (PLADECO); el cual indica que la Bahía de Quintero (Figura 3-1) se extiende sobre una planicie litoral entre la cordillera de la costa y el mar y cuenta con una superficie de 174,5 km², lo que representa el 1% de la superficie regional. Tiene un área rural de 162,23 km² y un área urbana de 12,27 km². La mayoría de su terreno es plano y con pendientes suaves. La utilización óptima del territorio se ve impedida por un gran sector de duna y por la carencia de riego en la zona agrícola.

Figura 3-1: Área de estudio Bahía de Quintero, V Región, Chile.



Fuente: GNL. 2009. Gas Natural Licuado [fecha de consulta: 04/02/2009]. Disponible en <http://www.gnlquintero.com/index.htm>

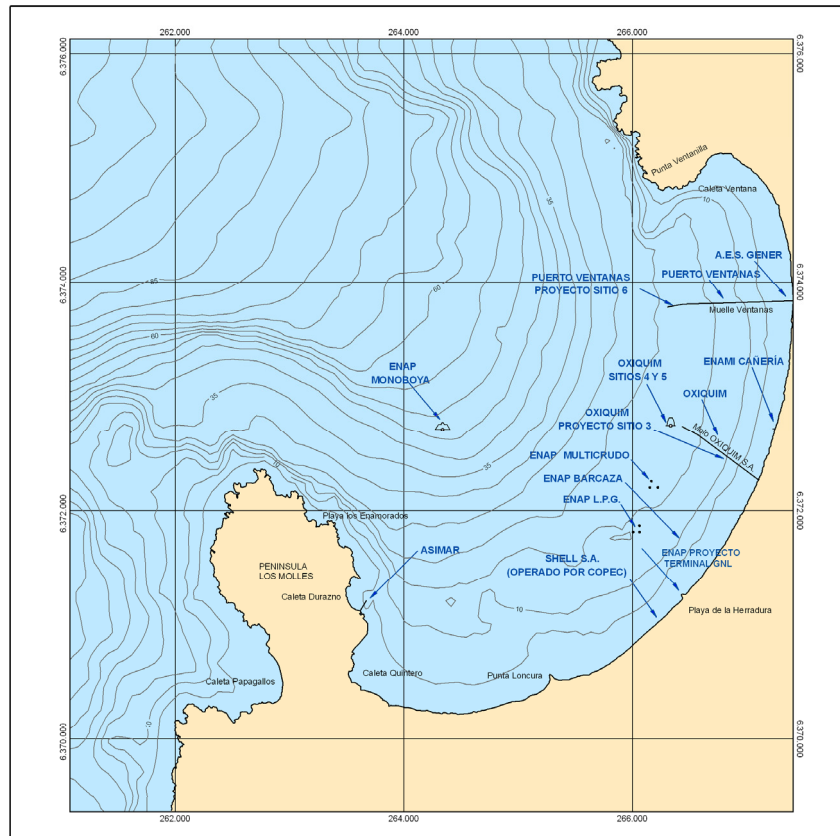
En esta diversidad territorial, la comuna de Quintero presenta tres grandes áreas de desarrollo que permiten definir en términos globales los roles en que se desea potenciar y que presenta directa relación con sus connotaciones geográficas, morfológicas y su condición costera marítima:

- Rol “Portuario e Industrial de Industrias Peligrosas”.
- Rol “Habitacional y Turístico”.
- Rol “Equipamiento y Servicios”.

Desde la visión nacional y regional de la comuna de Quintero, se le asigna una alta importancia al rol Portuario e Industrial que debe jugar en la zona central del país y en el complemento como puerto granelero, que constituye de puerto de Ventanas a la actividad portuaria que se realiza tanto de Valparaíso y San Antonio. Desde esta perspectiva, la actividad portuaria asociada a la región juega también un rol importante en lo que se ha denominado el corredor bioceánico de Sudamérica.

En el ámbito industrial, para la actividad de industrias peligrosas es estratégico el emplazamiento en el entorno de la Bahía de Quintero, debido a la asociación directa de esta actividad con la capacidad portuaria que tiene la bahía, y que se podrá observar en industrias actualmente existentes como OXIQUM, COPEC, ENAP y GNL; todas actividades industriales asociada al puerto (ver Figura 3-2).

Figura 3-2: Sector portuario de la Bahía de Quintero, V Región, Chile.



Fuente: Imagen de elaboración propia, con información entregada por Profesor Guía.

3.3 SECTOR POSIBLE DE DERRAME

La Autoridad Marítima debe evaluar los riesgos⁸ de la ocurrencia de un derrame de hidrocarburo, determinar el nivel de la capacidad de respuesta que se debe mantener en el país y en cada región y definir un plan de acción para enfrentar estas emergencias, siendo una herramienta de análisis muy útil predecir los escenarios más probables de emergencias de derrames.

Considerando que el riesgo de derrame está íntimamente ligado a las actividades petroleras y de transporte marítimo, que pueden variar significativamente de un año a otro, la determinación de estas áreas debe ser revisada periódicamente. Dado lo anterior, la determinación de las áreas de alto riesgo de derrame de hidrocarburo en la Bahía de Quintero, se realizará a partir de factores que se señalan a continuación.

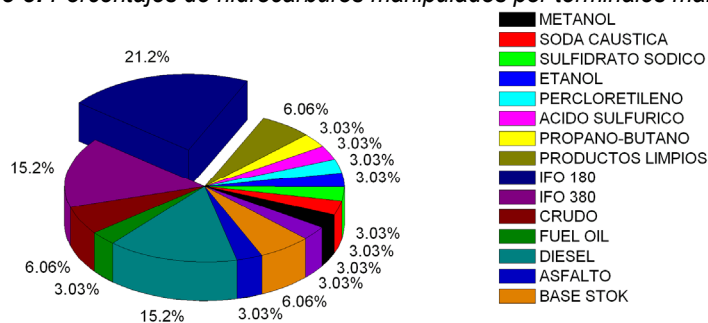
- Tamaño máximo y características de los buques tanque que transitan en el área.
- Registros históricos de derrames ocurridos en el área.
- Registros de accidentes marítimos en el área.
- Tipos de hidrocarburos transportados y/o transferidos.

El análisis de estos elementos permitirá perfilar escenarios más probables, es decir, predecir donde es más probable que ocurran derrames, de que magnitud, que tipo de hidrocarburo, que recursos serían afectados, que riesgos habrían, etc.

Para determinar el tipo de hidrocarburo y el punto de lance del mismo para la simulación, se determinó a partir de las tasas de transferencias de los principales Terminales Marítimos Petroleros y de Gas de la Bahía de Quintero desde el año 2000 a 2007, información obtenida de la página web de la Dirección del Territorio Marítimo de Chile (DIRECTEMAR) (Figura 3-3, Anexo A, Tabla A-1). A partir de ello, se obtuvo que el hidrocarburo más manipulado sea el IFO 180 (21,2%).

La determinación del punto de lance se realizó a partir del Terminal con mayor tasa de transferencia (desde el año 2000 a 2007), siendo el Terminal Monoboaya propiedad de ENAP Refinerías Aconcagua S.A., el cual posee una tasa de transferencia de recepción máxima de 1.300 ton/hora y de entrega entre 2.580 a 5.500 ton/hora (Figura 3-4). Además, para confirmar el volumen a derramar, se analizó información de los derrames ocurridos durante el período 1991 a 2006, obteniendo que el volumen máximo derramado en la Bahía de Quintero es de 140 m³.

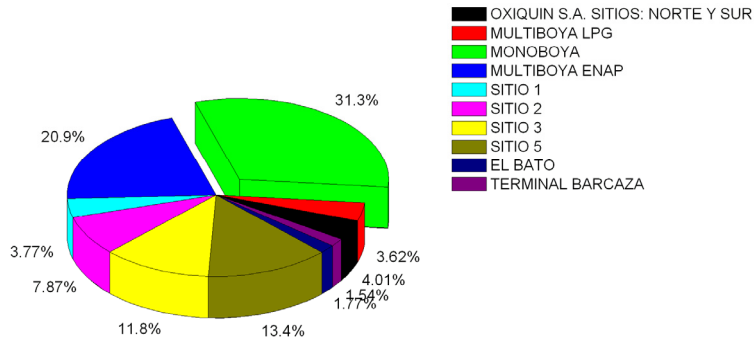
Figura 3-3: Porcentajes de hidrocarburos manipulados por terminales marítimos.



Fuente: DIRECTEMAR. 2009. Departamento de Preservación del Medio Ambiente Acuático y Combate a la Contaminación [fecha de consulta: 04/05/2009]. Disponible en: <http://www.directemar.cl/>

⁸ **Definición de riesgo ambiental:** Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que afecta directa o indirectamente al medio ambiente. Peligro (latente) ambiental al que puedan estar sometidos los seres humanos en función de la probabilidad de ocurrencia y severidad del daño.

Figura 3-4: Porcentajes de tasas de transferencia de hidrocarburos por terminales marítimas.

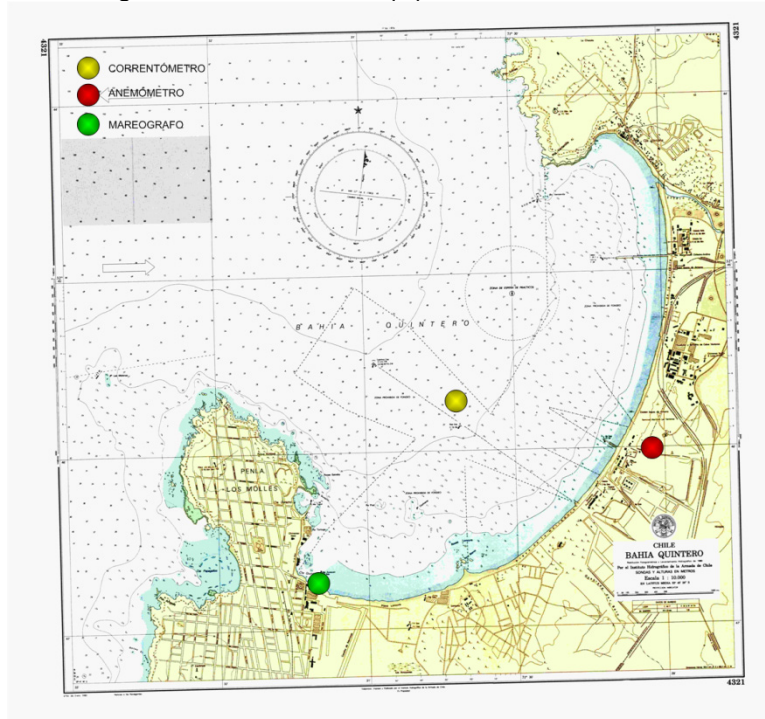


Fuente: DIRECTEMAR. 2009. Departamento de Preservación del Medio Ambiente Acuático y Combate a la Contaminación [fecha de consulta: 04/05/2009]. Disponible en: <http://www.directemar.cl/>

3.4 CONDICIONES AMBIENTALES

La presente sección contiene la descripción general de las condiciones oceanográficas (vientos, mareas y corrientes) de la Bahía de Quintero, datos que fueron obtenidos en salida a terreno durante el periodo de invierno del año 2006 (agosto a septiembre). La ubicación de los equipos utilizados para la medición de los parámetros oceanográficos analizados en esta sección se muestra en Figura 3-5 y Tabla 3-1.

Figura 3-5: Ubicación de equipos utilizados en estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio.

Equipo	Coordenadas Geográficas	
	Latitud	Longitud
Anemómetro	32°46'20.38"S	71°29'24.63"O
Correntómetro	32°46'15" S	71°30'21"O
Mareógrafo	32°46'48.20"S	71°31'35.63"O

Fuente: Elaboración propia.

El principal criterio empleado para la selección de los datos de campos fue la disponibilidad de dicha información; y las especificaciones en “Instrucciones Oceanográficas SHOA Pub. 3201 Instrucciones Oceanográficas N° 1 Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos, 3ª edición 2005”.

3.4.1 VIENTOS

La climatología de viento de la zona central donde se ubica la Bahía de Quintero, se encuentra fundamentalmente afectada por la presencia y migraciones latitudinales del centro de alta presión del Pacífico sur. Este centro de altas presiones se ubica inmediatamente al oeste de las costas centro – norte del país, y se caracteriza por vientos anticiclónicos, con lo cual en la costa chilena del centro del país predominan los vientos del S y SW.

Estos vientos son usualmente más intensos y sostenidos durante primavera y verano, en tanto que durante la época de otoño e invierno, producto de la migración hacia el N del centro de altas presiones, la presencia de vientos del N y NW, tienen fuerte correspondencia con la presencia de frentes de mal tiempo.

Antecedentes locales para la Bahía de Quintero muestran que los vientos tienen una predominancia del tercer y cuarto cuadrante⁹. La bahía es abierta a los vientos del NW y del W, pero el sector norte (Caleta Ventanas), ofrece cierta protección a los vientos del norte. Las intensidades son variables pero los vientos del N alcanzan fuerza de 6 a 7 en la escala Beaufort en época de invierno, mientras que los componentes S y SW pueden alcanzar fuerza 5 en la misma escala.

De acuerdo al análisis de datos de vientos obtenidos a través de la salida de terreno realizada durante el 04 de Agosto del 2006 al día 30 del Noviembre del 2006, siendo el intervalo de muestreo de 60 segundos (ver Anexo B); se observa que la estadística básica de la intensidad del viento se registra un máximo de 6,750 m/s, correspondiente a escala Beaufort 4, “Viento Moderado”.

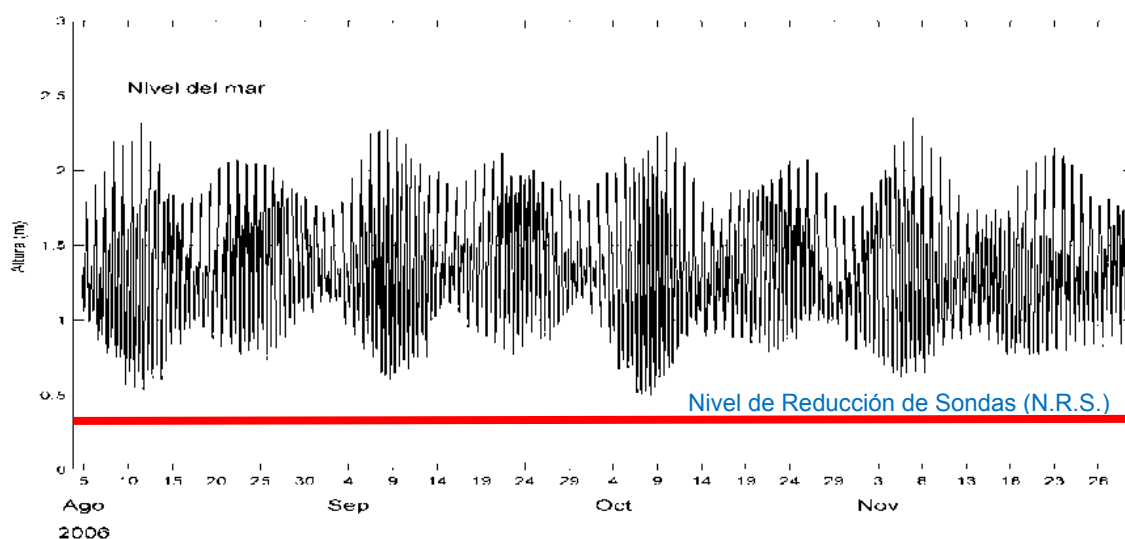
En el análisis de la frecuencia de la intensidad del viento en la Bahía de Quintero, para el período de agosto-noviembre del 2006, se observa que el 6,1% de los datos corresponden a calmas; por otro lado el 42,2% de los datos corresponden al intervalo de 0,3 – 1,5 m/s, correspondiente a vientos tipo brisa débil. Para el rango con magnitudes mayores a 5,5 m/s, los datos registraron el 0,2%. El análisis de la información revela el predominio de los vientos del E (19,3%) seguido de los provenientes del W (18,7%) y S (13,5%), lo cual se corrobora en Figuras y Tablas de Anexo B.

⁹ Los rumbos por cuadrantes van de 0° a 90°. Se indican primero con el punto cardinal Norte o Sur, después el número de grados y después el punto cardinal (Este u Oeste) hacia donde está la proa. Los del 1° y 3° cuadrantes son positivos y los del 2° y 4° negativos.

3.4.2 MAREAS

Para la generación de las condiciones de borde de marea a lo largo del contorno abierto se utilizó una serie de tiempo de valores horarios de las variaciones del nivel del mar (Ver Figura 3-5). Del análisis realizado se obtiene que el régimen de mareas en la bahía de Quintero es semi-diurno mixto, es decir, que en un día ocurren dos pleamares y dos bajamares.

Figura 3-6: Registro de Nivel Medio del Mar de la bahía de Quintero, V Región, Chile.



Fuente: Elaboración propia.

Del registro de nivel de mar analizado (agosto a noviembre del 2006), se observa que el N.R.S. (Nivel de Reducción de Sondas) es de 0,408 m, y 1,333 m corresponde al N.M.M. (Nivel Medio de la Marea). Los demás valores se muestran en Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Valores no -armónicos obtenidos del análisis de mareas en la Bahía de Quintero.

Plano Mareal	Sobre Cero Registro (m)
Altura Pleamar más Alta Observada	2,35
Altura Media de las Pleamares más Altas	1,97
Altura Media de las Pleamares	1,78
Nivel Medio del Mar	1,34
Nivel Medio de la Marea	1,33
Altura Media de las Bajamares	0,89
Altura Media de las Bajamares más Bajas	0,81
Altura Bajamar más Baja Observada	0,50
Nivel de Reducción de Sondas (N.R.S.)	0,41

Fuente: Elaboración propia.

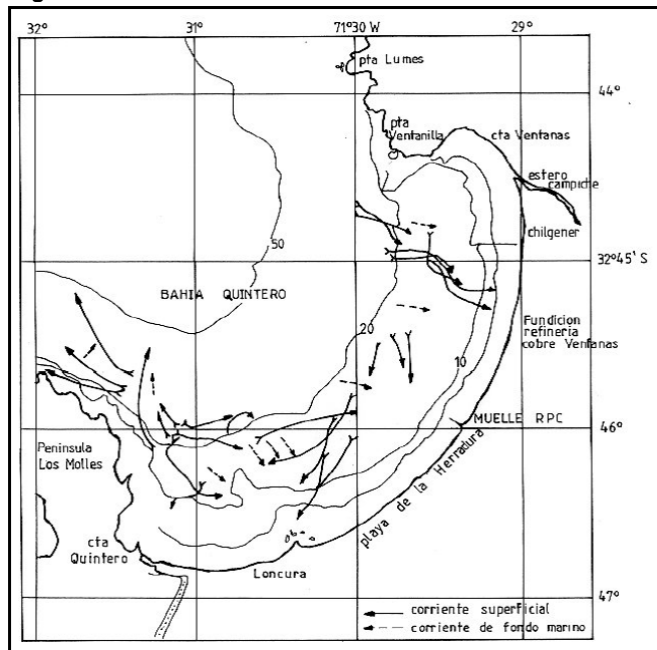
3.4.3 CORRIENTES

A continuación se entregan antecedentes de los patrones de corrientes evaluados en la Bahía de Quintero. Un estudio de Escobar et al. (1971) Figura 3-7, indica que según la dirección de las corrientes superficiales en la Bahía de Quintero, las aguas entrarían por el sector norte de la boca y saldrían por el sur. Según Bakovic y Balic (1984) (Figura 3-8), la circulación y velocidad de las aguas en la bahía están influenciadas por las corrientes de marea, observando en una condición llenante las corrientes dirigidas hacia el interior de la bahía, situación opuesta a la observada en marea vaciante, en la cual las corrientes tienden a orientarse fuera de la bahía.

Observaciones efectuadas por Malet y Andrade (1991) mediante el uso de elementos lagrangianos y correntimetría euleriana, mostraron que la dinámica de las aguas de la Bahía de Quintero presenta un sistema de doble celda permanente, con giro en sentido ciclónico, con un flujo de entrada por el norte de la bahía y un flujo de salida por el sur (Figura 3-9), similar a lo descrito por Bakovic y Balic (1984). Las velocidades máximas medidas fueron del orden de 10 cm/s en superficie y de 20 cm/s en el fondo. Al interior de la bahía y en aguas someras próximas a la orilla, la velocidad disminuyó observándose desplazamientos de tipo estacional de las celdas.

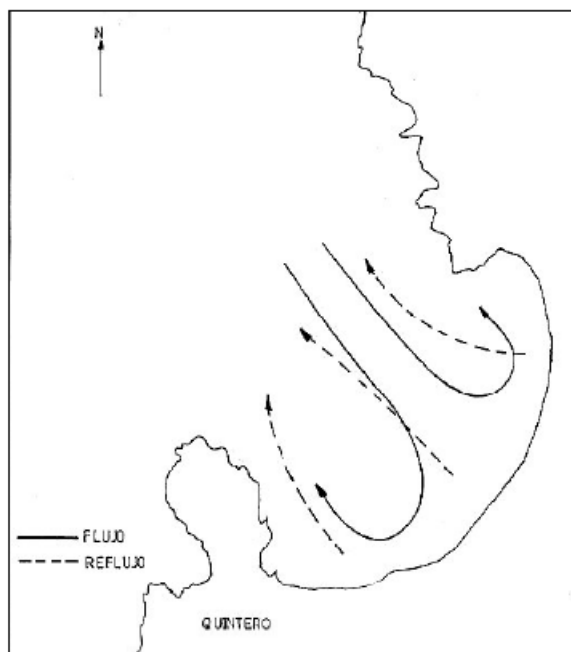
El resultado obtenido por el modelo hidrodinámico RMA2, demuestra la existencia de un patrón de circulación caracterizado por los autores anteriores y contribuyen a la dispersión de hidrocarburos. Por lo que se puede establecer que las corrientes tienden desplazarse preferentemente en sentido reloj (ciclónico); situación que puede corresponder a la existencia de un flujo residual que tiende a penetrar por el norte de la bahía, confirmando lo señalado por Escobar et al (1971).

Figura 3-7: Circulación de las corrientes – Escobar et al 1971.



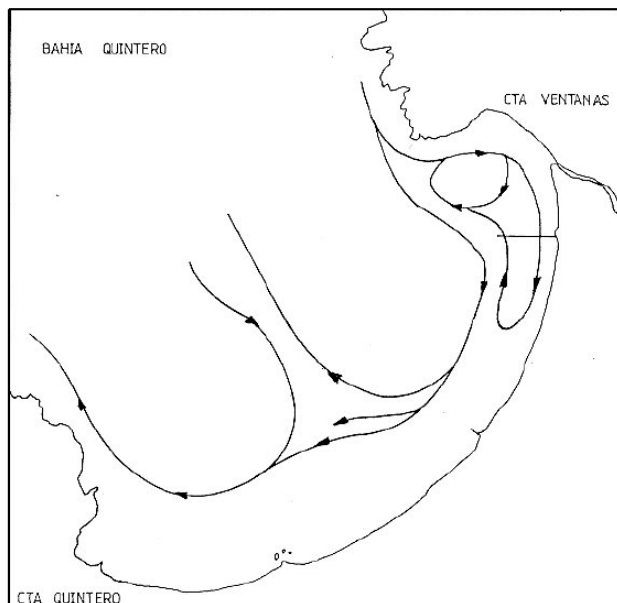
Fuente: Escobar et. al 1971.

Figura 3-8: Circulación de las corrientes – Bakovic y Balic, 1984.



Fuente: Bakovic y Balic, 1984.

Figura 3-9: Circulación de las corrientes – Malet y Andrade, 1991.



Fuente: Malet y Andrade, 1991.

Las máximas velocidades se asociaron tanto a la componente N-S, como E-W con magnitudes de hasta 4 cm/s. Similar característica se ha observado cerca de la costa hacia el sector central de la bahía, para el periodo de marea vaciante en el cual la velocidad de las corrientes superficiales, presenta un modelo de aguas divergente hacia el SW y NW, mostrando que la dinámica de las aguas tiende a vaciar las aguas de la bahía, alejándolas de la costa.

A continuación se entregan antecedentes de corrientes euleriana, cuyo análisis y ubicación del equipo se muestra en Anexo B (Ver Figuras B-1 y Tabla B-1). Se presentan datos de corrientes obtenidas desde el 04 de agosto al 30 de noviembre del año 2006, mediante el uso de un correntómetro modelo RDCP600, en un punto ubicado hacia el centro de la bahía y se obtuvo datos del vector de corriente con un intervalo de muestreo de 10 minutos, determinándose 19 celdas (capas), siendo el espesor de estas de 1 m.

Para el procesamiento se consideraron la totalidad del registro. El análisis de los datos se realizó considerando tres niveles (capas) en la columna de agua (superficie, intermedio y fondo). A continuación se muestra la profundidad media de capa usada en el análisis:

Capa 16 3,0 m Profundidad medida desde la superficie.

Capa 8 9,0 m Profundidad medida desde la superficie.

Capa 2 16,0 m Profundidad medida desde la superficie.

Una vez recuperados los datos desde el equipo, se determinó la magnitud y dirección de la corriente a partir de las series de tiempo de las componentes del vector de corrientes. Posteriormente los datos de dirección fueron referidos al Norte geográfico mediante la corrección por variación magnética.

Las series corregidas (magnitud y dirección de la corriente para cada celda) fueron procesadas mediante herramientas estadísticas estándares, refiriendo las direcciones a una rosa de 8 puntas. Para este análisis se empleó la totalidad de las observaciones de corrientes con un intervalo de muestreo de 10 minutos. Se debe destacar que las corrientes con magnitudes iguales o inferiores a 0,01 m/s fueron consideradas calmas.

Según la estadística básica de las series de datos de corrientes registradas cada 10 minutos (Tabla 3-2) la máxima intensidad (0,56 m/s) se registro en la capa superficial (3,0 m). La distribución de frecuencia de magnitud de la corriente indica que en los niveles intermedio y profundo predominan corrientes de baja intensidad (menores a 0,11 m/s) abarcando más del 90% de los registros (considerando las calmas). Mientras que en el nivel superficial se registraron corrientes superiores 0,21 m/s, excediendo el 30%; para más detalle observar Anexo B.

Tabla 3-2: Estadística básica de las celdas de corrientes.

Valor Estadístico	Celda 16 (m/s)	Celda 8 (m/s)	Celda 2 (m/s)
Máximo	0,56	0,27	0,15
Mínimo	0,00	0,00	0,00
Media	0,15	0,05	0,05
Varianza	0,01	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

La dirección predominante de las corrientes para la zona a nivel superficial fue variable con direcciones SW, S y SE, abarcando en conjunto el 50,80% de los datos; en profundidad las direcciones predominaron al E, SE, S, SW y W, mientras que en el nivel intermedio la tendencia fue

hacia el S y SW, lo que se puede apreciar en las rosas de direcciones (Ver Anexo B, Figuras B-7 a B-9). En general se puede apreciar una tendencia de las corrientes hacia el segundo y tercer cuadrante.

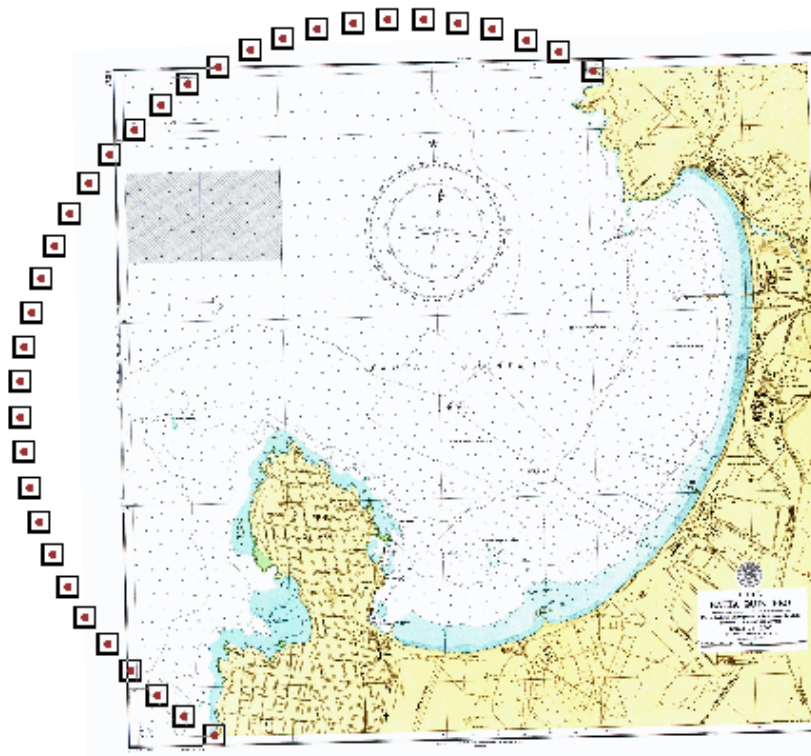
La tendencia residual de la circulación del área de estudio, para el período de la medición, es estimada mediante diagramas de vector progresivo (DVP). Pevio a esto, los datos registrados cada 10 minutos fueron reducidos a valores horarios utilizando un promedio simple. Los diagramas de vector progresivo (Anexo B, Figuras B-14 a B-16) muestran la tendencia residual de la circulación a diferentes niveles de profundidad durante el período de medición. En todos los niveles se evidenció una circulación residual entre el SW y SE, con una distancia promedio de los tres niveles de 0,059 Km. y una velocidad residual en promedio de 0,02 m/s.

3.5 GENERACIÓN DE GRILLA COMPUTACIONAL

3.5.1 REGIÓN DE MODELACIÓN

La definición de la región de modelación debe conciliar tanto los objetivos del estudio, como los requerimientos propios del programa que se utiliza, por lo que, además de incluir todas aquellas zonas de interés, debe ser compatible con las opciones que ofrece el programa para la especificación de las condiciones de borde. En este caso la región de contorno fue definida mediante dos tipos de elementos, como se muestran en Figura 3-10.

Figura 3-10: Región de modelación.



Fuente: Elaboración propia.

La línea de costa de la Bahía de Quintero no se le definió ninguna característica, mientras que el límite del modelo correspondiente a la región de mar abierto fue definido mediante la especificación de una señal de marea uniforme para todos los nodos, caracterizando de este modo la variación del nivel del mar en esta zona.

3.5.2 CONFECCIÓN DE LA MALLA

La malla de elementos finitos corresponde a una división del medio continuo que se desea modelar. Está compuesta por un conjunto de elementos cuyos lados se encuentran definidos por nodos y vértices. Para su confección, es necesario ubicar espacialmente estos nodos, por lo que resulta imprescindible contar con la información de batimetría adecuada.

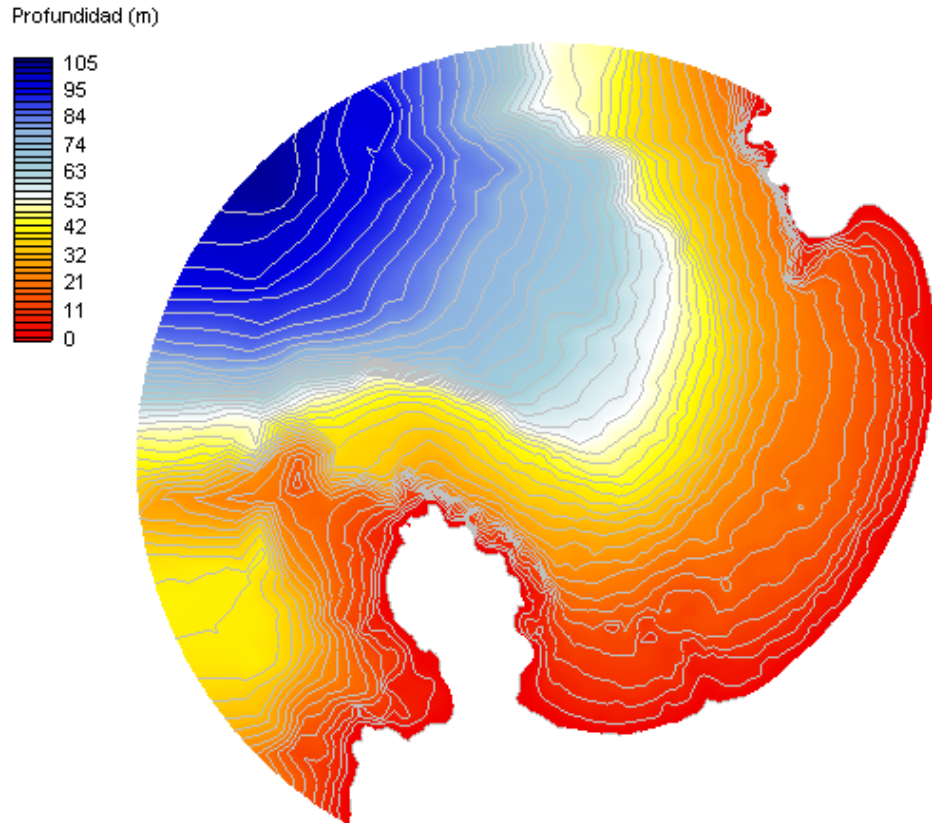
El proceso de confección de la malla es habitualmente desarrollado por rutinas incorporadas en los programas de modelación, las que ofrecen múltiples formas de ajustar el mallado. Se deberá tener en cuenta que una malla más fina permitirá obtener mayor estabilidad y precisión, pero a un costo computacional mayor. En consecuencia, es importante distribuir correctamente el tamaño de los elementos sobre toda la extensión del modelo, ya que ello optimizará los recursos utilizados.

También se debe evaluar la calidad del mallado para diagnosticar posibles problemas en la modelación. Al respecto, el número total de elementos entregará una idea del costo computacional de llevar a cabo la modelación, por lo que se deberá equilibrar la precisión de los resultados con el tiempo y espacio (almacenamiento de datos) destinado para tal efecto. Otro indicador del propio programa RMA2, incorporan procesos de verificación de la calidad de éste, por lo que también es recomendable revisar los resultados obtenidos en cada caso.

Para distribuir adecuadamente el tamaño de los elementos sobre la región de modelación, es posible recurrir a diferentes algoritmos que facilitan la confección de la malla. El programa SMS incluye, entre otros, los siguientes: adaptative tessellation, scalar paving density y paving. Este último método emplea una técnica de avance, sobre la base de la distribución de vértices en las fronteras, creando triángulos equiláteros al interior del dominio y corresponde al algoritmo utilizado en este caso. El procedimiento involucra dos etapas principales: la confección de la malla a partir de la función paving y una revisión por parte del programa SMS, que permite corregir defectos particulares y evaluar la calidad de la malla generada.

- ***Etapas 1 - Malla base:*** Para confeccionar la malla base del modelo, se requieren principalmente dos cosas: la información de las condiciones de borde, descritas anteriormente; y la información de batimetría a partir de información proporcionada por la carta náutica correspondiente, que además de caracterizar la profundidad, puede ser utilizada para distribuir adecuadamente el tamaño de los elementos. La Figura 3-11 presenta la batimetría finalmente asignada a la región de modelación.

Figura 3-11: Batimetría de la región de modelación.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de modelaciones que involucren fenómenos causados por ondas de marea, se deberá tener en cuenta que la dimensión de los lados de cada elementos tendrá que ser significativamente menos a la longitud de onda correspondiente, recomendándose para ello una relación superior a 100, tal como se señala en la siguiente ecuación.¹⁰

$$\frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{T\sqrt{gd}}{\Delta x} > 100$$

Donde:

- Δx : Longitud de un lado de un elemento, m.
- λ : Longitud de la onda de marea (aguas someras), m.
- T : Período de la onda de marea, segundos.
- g : Aceleración de gravedad, m/s^2 .
- d : Profundidad media del lado del elemento considerado, m.

¹⁰ García RN, 2009. *Evaluación del Potencial de la Energía Originada por Corrientes de Marea para Generación en Sistemas Aislados*, Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Obras Civiles. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. 210 pp

Posteriormente se definió una función para establecer el tamaño de los elementos de la malla. Para ello se utilizó una función similar a la expresión que define la longitud de onda en aguas someras, como se expresa en la siguiente formulación:

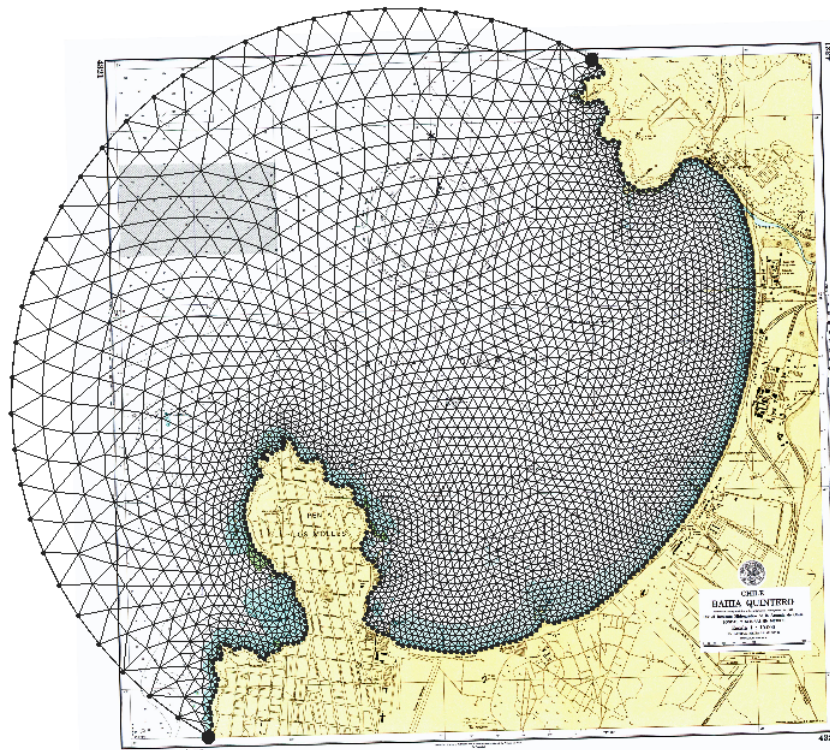
$$\Delta x = \alpha \sqrt{gd} \rightarrow 10 \sqrt{gd}$$

Donde:

- Δx : Longitud de un lado de un elemento.
- g : Aceleración de gravedad.
- d : Profundidad media del lado del elemento considerado.

El valor de α se determinó de manera que pudiesen representarse adecuadamente los diferentes accidentes geográficos que, por lo general, se ubicaban en zonas de baja profundidad. Considerando que en la línea de costa posee un dimensionamiento de 17602,09 m, mientras que la condición de mar abierto es 1271,52 m, se optó por definir un tamaño mínimo de aproximadamente 60 m, con una profundidad media de 3 m para la línea de costa; mientras que la condición de mar abierto el tamaño mínimo es aproximadamente 360 m, con una profundidad media de 100 m, lo que era logrado con un valor de α igual a 10. Para la discretización del dominio se utilizaron elementos cuadráticos, contando con 2715 elementos y con 5646 nodos (Figura 3-12 y Tabla 3-3); dado que el sistema está constituido por una extensa área, el mallado de la superficie se realizó intensificando la definición de los elementos en las cercanías a la línea de costa de Bahía Quintero, V Región.

Figura 3-12: Malla de elementos finitos empleada en modelo hidrodinámico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-3: Información de la malla.

Número de elementos	6697
Numero de nodos	13728
Profundidad mínima m	0,00
Profundidad máxima m	105,12
Tipo de elemento	Cuadrático
Número de elementos triangulares	6697

Fuente: Elaboración propia.

- **Etapa 2 – Revisión:** No importando el método utilizado para crear la malla de elementos finitos, se debe revisar la calidad de ésta para evitar problemas asociados al cálculo numérico; este proceso lo realiza el programa SMS a través de su selección “Model Chek”. La Figura 3-12 muestra una imagen de la malla finalmente utilizada.

3.6 CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO

Las propiedades asignadas a la malla se realizaron a partir de la lógica y el entendimiento de la física, definidas sobre la base de la batimetría y la carta náutica N° 4321. Los valores numéricos de las propiedades fueron asignadas basándose en las recomendaciones de los manuales de funcionamiento de los modelos. Los valores se revisaron posteriormente en el proceso de calibración para mejorar las predicciones y compararlas antecedentes históricos del patrón de circulación de la Bahía de Quintero.

- **Superficie libre:** Las tensiones generadas por viento, serán excluidas del presente trabajo debido a que no influyen en la las corrientes generadas por mareas.
- **Fricción del fondo:** De acuerdo a la ecuación de tensión en el fondo por fricción y siendo el valor de Manning’s recomendado de 0,0025; la velocidad máxima de la capa superficial del análisis de datos *in situ*, correspondiente 0,56 m/s, el radio hidráulico de R=1230,82 m, la densidad del agua de mar estándar de 1025 kg/m³ y la aceleración de gravedad de 9,81 m/s². La tensión en el fondo por fricción es:

$$\tau = \frac{g\rho n^2}{R^{1/3}} V^2 = 0,184 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}$$

- **Coefficiente de viscosidad de remolino:** Como guía para la selección de valores razonables para los coeficientes de viscosidad de remolino, se utilizaron las recomendaciones realizadas en “Manual de Modelo RMA2”; utilizando la asignación directa e iniciando la simulación con un valor de 100 kg/m²s⁻¹, llegando en el proceso de calibrado a un valor de 2000 kg/m²s⁻¹.
- **Mar abierto:** El límite correspondiente a la región abierta fue definida mediante un arco semicircular, que permite forzar el modelo mediante la asignación de parámetros que representan la variación temporal del nivel del mar a través de éstos.

Basándose en el hecho de que la región de modelación es relativamente pequeña, la variación del nivel del mar en los contornos de ésta debiera mantener un comportamiento similar, por lo que podría utilizarse el único registro disponible para caracterizar las variaciones del nivel del mar en los contornos del modelo. Se utilizó la serie de nivel del

mar obtenido en mediciones de terreno, incorporando un desfase espacial¹¹ que se produciría debido a la propagación de la onda de marea a través de éstas.

Suponiendo que la onda de marea proviene del Océano Pacífico ingresa a través del norte de la Bahía de Quintero siguiendo una trayectoria similar a la mostrada en la Figura 3-13, sería posible estimar el tiempo que tardaría en alcanzar los diferentes nodos que componen la región de contorno definida por un arco semicircular.

Dado que la trayectoria es aproximadamente paralela al segmento que une el extremo del arco semicircular, el frente de onda de marea podría aproximarse a una recta perpendicular a dicho segmento, por lo que el desfase experimentado por un nodo ubicado en la región de contorno respecto al primer nodo del arco correspondiente, sería proporcional a la distancia comprendida entre el frente respectivo, tal como se representa en la Figura 3-13.

Figura 3-13: Propagación de onda de marea.



Fuente: Elaboración propia, (reproducción parcial Google Earth).

El desfase total de cada arco puede ser estimado a partir del tiempo que tarda un frente de onda de marea en recorrer una trayectoria definida entre el primer y último nodo. Como la marea es una onda que se propaga en aguas someras, el tiempo de propagación puede ser estimado mediante la siguiente ecuación:

$$t_p = \frac{l}{v_{as}} = \frac{l}{\sqrt{gd}}$$

Donde:

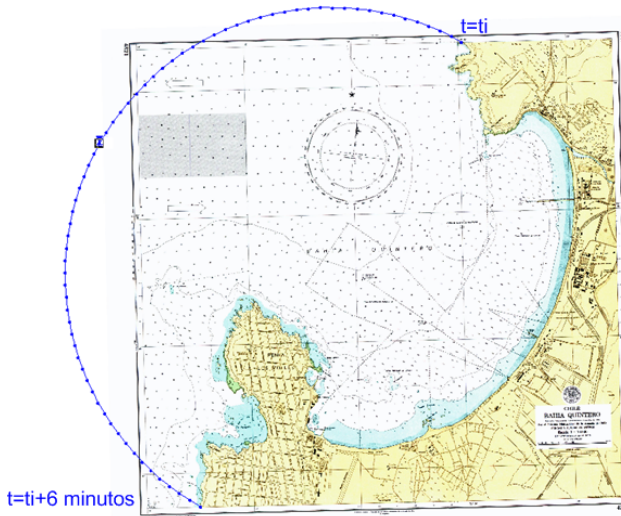
- t_p : Tiempo de propagación, minutos.
- l : Longitud del trayecto recorrido, m.
- v_{as} : Velocidad de propagación de la onda de marea (aguas someras), m/s.

¹¹ No debe confundirse este desfase espacial con el desfase relativo obtenido para cada constituyente a partir del registro de datos. Este último corresponde al desfase temporal que existe entre los diferentes constituyentes utilizados para analizar el registro del punto de medición y considera, en cierta forma, los términos nodal factor y equilibrium argument para el período analizado.

- g : Aceleración de gravedad, m/s^2 .
- d : Profundidad media del trayecto considerado, m.

Al discretizar la ecuación anterior sobre la trayectoria definida, se obtuvo el desfase total para el arco, correspondiente a 6 minutos. El procedimiento descrito se traduce en la asignación de una señal única, confeccionada a partir del registro del nivel del mar al interior de Bahía, pero desfasada para cada nodo de la región de contorno en función del tiempo estimado que tardaría en propagarse la onda de marea. La Figura 3-14 esquematiza este resultado.

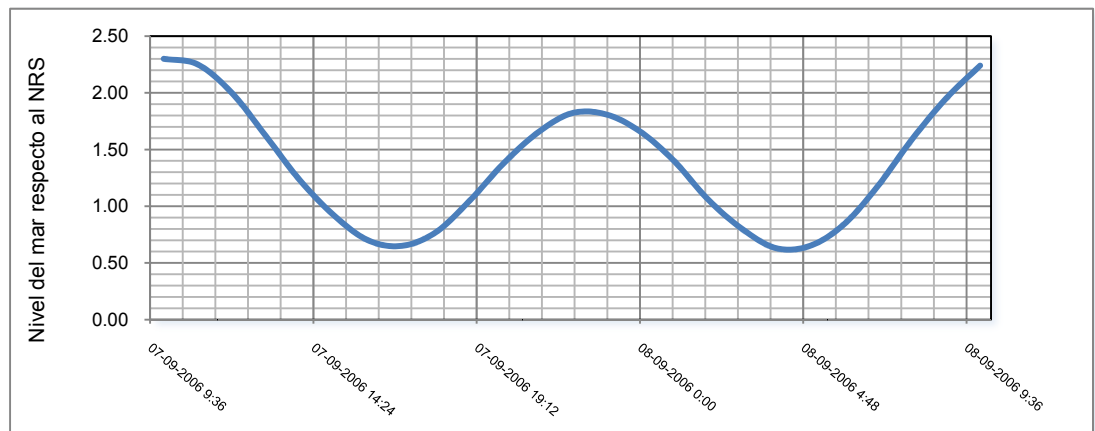
Figura 3-14: Resultado del desfase en la región de contorno abierta.



Fuente: Elaboración propia.

De este modo, se utilizó una serie de datos horarios de mareas (la información a utilizar corresponde al 7/09/2006 a 10:00 horas hasta 8/09/2006 a 10:00 horas), cuyo resultado es comparado con los datos de velocidad y dirección de la corriente a través de sus componentes ortogonales. Los datos de mareas utilizados se muestran en Figura 3-15.

Figura 3-15: Señal de marea.



Fuente: Elaboración propia.

- **Coefficiente de dispersión:** Los coeficientes de dispersión fueron determinados aplicando formulación implementada en el documento denominado “Efecto de los Coeficientes de Dispersión sobre la Modelación Bidimensional del Transporte de Contaminantes. Caso de Estudio”, realizado por G. Buscaglia, E. Dari, O. Zamonsky, Bariloche. Argentina. 2004. Los coeficientes de dispersión deben tener en cuenta el efecto de no uniformidad en la distribución de velocidades sobre la distribución de los contaminantes en el flujo, se pueden expresar en función de parámetros adimensionales dependientes de la profundidad h y de la velocidad de corte u^* .

$$D_{lon} = k_l hu^*$$
$$D_{tran} = k_t hu^*$$
$$u^* = 3,13 Un/h^{1/6}$$

Donde, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual se ha considerado 0,025 de acuerdo a recomendaciones del User’s Manual RMA2, y U la velocidad media de la corriente. En simulaciones efectuadas en la Bahía de Quintero bajo corrientes de marea de magnitud y dirección variables, se estimó que los coeficientes D_{lon} y D_{tran} , en la zona costera considerando $h=47,98$ m considerando una velocidad uniforme de $|U|=0,45$ m/s y $n=0,025$ resultando $u^*=0,0185$ m/s. Se adoptó $k_l=k_t=0,3$, recomendado para canales meandrosos, resultando $D_{lon} = D_{tran}=0,2658$ m²/s; valor utilizado para las simulaciones iniciales.

- **Volumen derramado:** Para las condiciones de borde se consideró una cantidad derramada de 100 m³, de acuerdo a la clasificación de tipo de derrames (derrames mayores)¹².
- **Concentración del hidrocarburo:** Para determinar la concentración del hidrocarburo seleccionado (IFO-180), para la realización del modelo RMA4, se supuso un accidente mayor, clasificado anteriormente como un derrame de 100 m³, además la densidad del IFO-180, es de 950 kg/m³, por lo que la masa del IFO-180 es de 95000 kg; además del volumen del elemento de 1000 m³, obteniendo una concentración de 95 kg/m³ para el hidrocarburo IFO-180.

¹² Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Chile). 1994. Manual sobre la contaminación ocasionada por hidrocarburos. Parte II: Planificación para Contingencias, 63 pp. DGTM y MM, Valparaíso.

4 RESULTADOS

En esta sección, se estudia la validez del modelo RMA2 para representar la hidrodinámica de la Bahía de Quintero. Para ello se comparan los resultados numéricos obtenidos a partir de simulaciones con los datos referentes de patrones de corrientes evaluados en esta bahía (Escobar et al. 1971; Bakovic y Balic 1984; Malet y Andrade 1991). Además se comentarán los resultados obtenidos a través del modelo RMA4, analizando las isolíneas de la mancha superficial del petróleo que sólo está gobernada por las corrientes y la difusión.

4.1 HIDRODINÁMICA DE BAHÍA QUINTERO

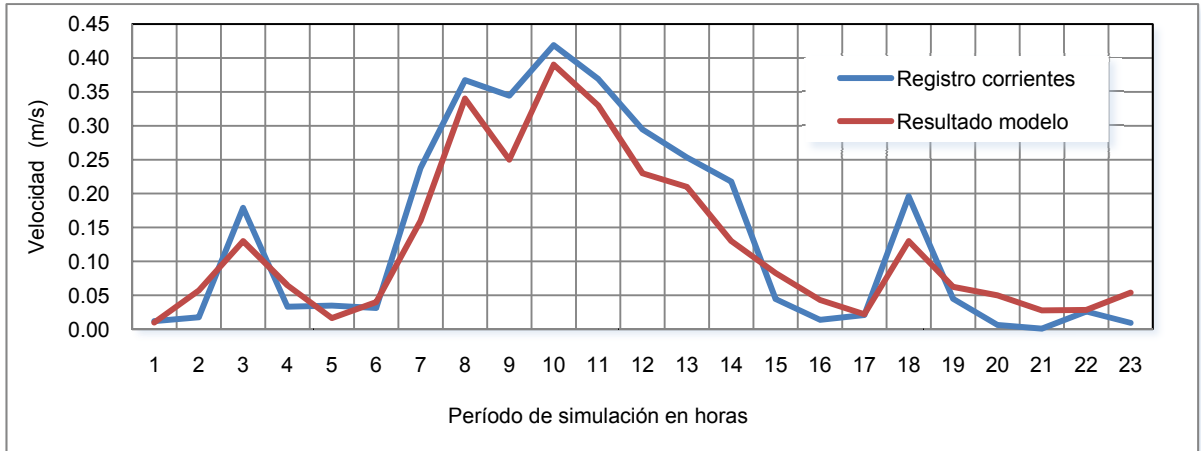
Se realiza una validación de los resultados entregados por el modelo hidrodinámico comparando los resultados de los modelos conceptuales presentados por Escobar et al. (1971); Bakovic y Balic (1984) y Malet y Andrade (1991). Esta aproximación al no ser cuantitativa tiene el sesgo propio de la interpretación que el lector pueda estimar.

Debido a lo anterior, se validan los resultados corriendo el modelo con intervalos horarios por un período de 25 horas, siendo alimentado por datos horarios de mareas (la información a utilizar corresponde al 7/09/2006 a las 10:00 horas al 8/09/2009 a las 10:00 horas), siendo comparados con los resultados de velocidad y dirección de la corriente a través de sus componentes ortogonales. Además se realiza una comparación con los resultados de mareas observados versus los resultados modelados. Los resultados se muestran en las Figuras 4-1 y 4-14. De estas salidas se extrajo el dato de corriente y marea sobre el nodo donde se encuentra el correntómetro y el mareógrafo, respectivamente (ubicación de los instrumentos de medición se muestra en la Figura 3-5 y en la Tabla 3-1).

A través de diferentes modelaciones desarrolladas, se observó que la magnitud de las velocidades al interior de la Bahía de Quintero presentaba cierta relación. Es necesario señalar que al obtener sólo un sector de medición, presenta ciertas desventajas para la calibración de un modelo hidrodinámico, principalmente debido que al obtener series de datos de corrientes en diferentes puntos al interior de la bahía, permitirían comprobar su patrón de corrientes.

La verificación de las corrientes obtenidas por el modelo se realizó con los antecedentes proporcionados por las mediciones efectuadas en la Bahía de Quintero. Si bien la magnitud de las corrientes máximas presentaba cierta similitud (Figura 4-1), el patrón de dirección y variación espacial de las velocidades determinadas por el modelo no se ajustaba a las mediciones.

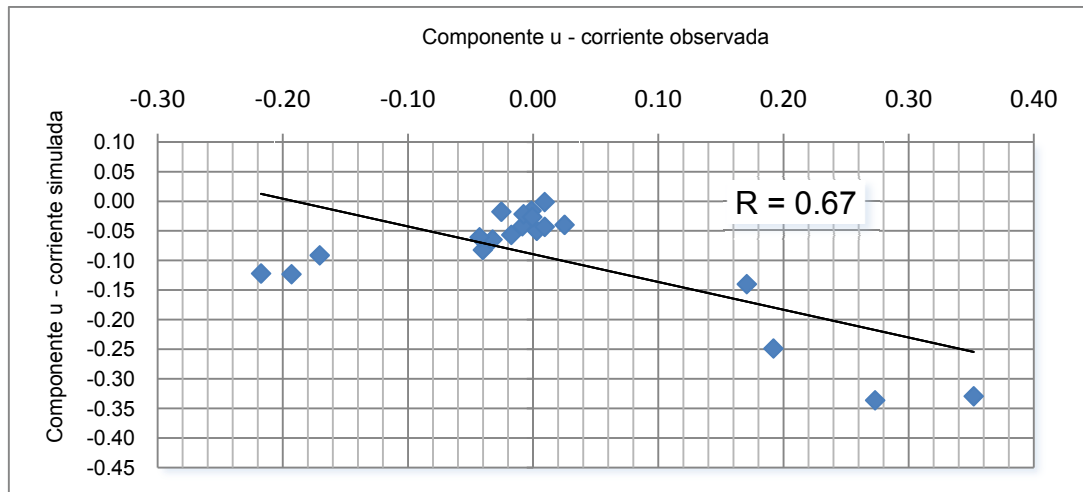
Figura 4-1: Comparación corrientes observada versus simulada.



Fuente: Elaboración propia.

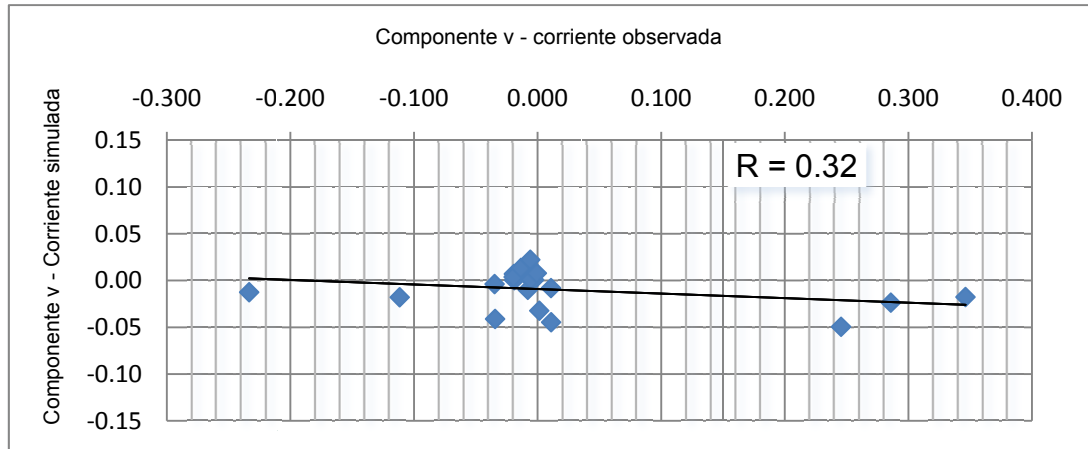
Los resultados obtenidos a partir del ajuste de regresión lineal para obtener el coeficiente de correlación entre las componentes ortogonales de la serie observada y modelada de corrientes se reconoce un grado de asociación entre las componentes u de 0,672 (Figura 4-2), mientras que al contrastar las componentes v de la serie observada y modelada se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,32 (Figura 4-3).

Figura 4-2: Correlación componente u – serie observada v/s modelada de corrientes.



Fuente: Elaboración propia.

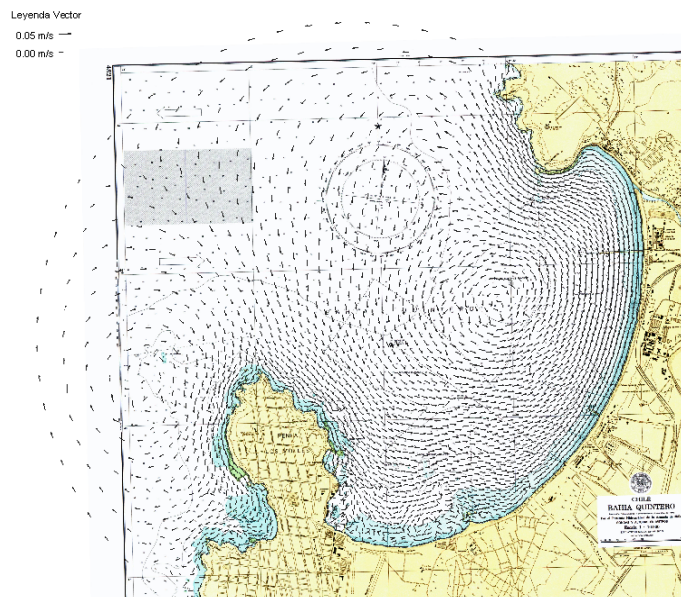
Figura 4-3: Correlación componente v – serie observada v/s modelada de corrientes.



Fuente: Elaboración propia.

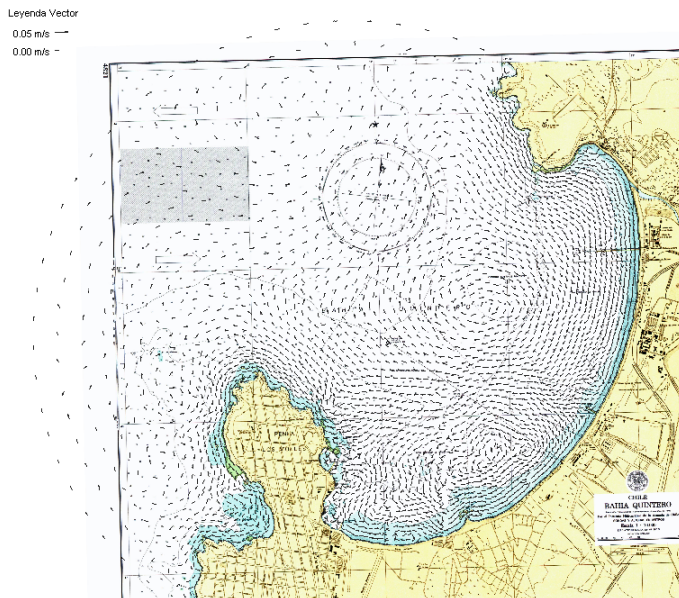
Entre el patrón observado de la simulación y los patrones de circulación descritos por otros autores, es similar, sin embargo, se presentan diferencias al momento de comparar los resultados de la simulación con los datos del correntómetro (Figuras 4-4 a 4-11), considerando que las corrientes indiscutiblemente poseen un predominio hacia el sur en el sector de ubicación del correntómetro durante el período de agosto – noviembre del 2006, pero durante el período correspondiente al 7/09/2006 a las 10:00 horas y el 8/09/2006 a las 10:00 horas, el vector progresivo de la corriente superficial muestra claramente una tendencia hacia el 1^{er} y 2^{do} cuadrante (Figura 4-12), coherente con los resultados obtenidos del modelo hidrodinámico y que se demuestra con el coeficiente de correlación obtenido del análisis de regresión lineal entre las componentes ortogonales de la corriente observada versus la simulada.

Figura 4-4: Simulación dinámica – 3 horas.



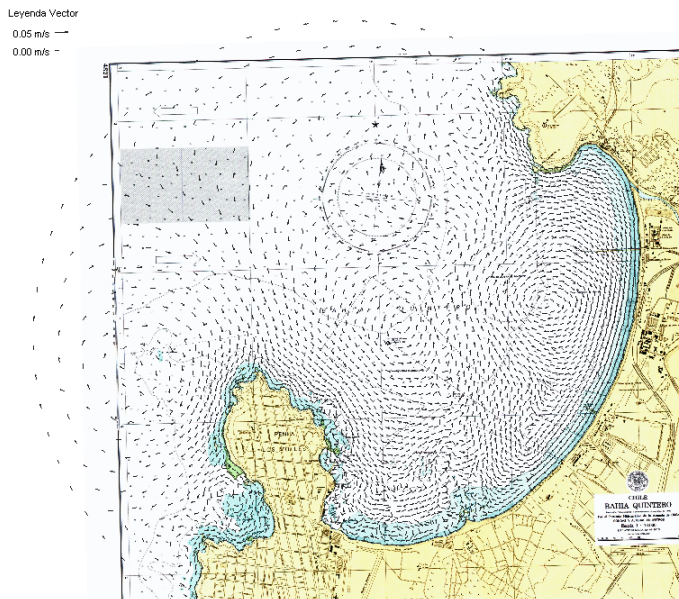
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-5: Simulación dinámica – 6 horas.



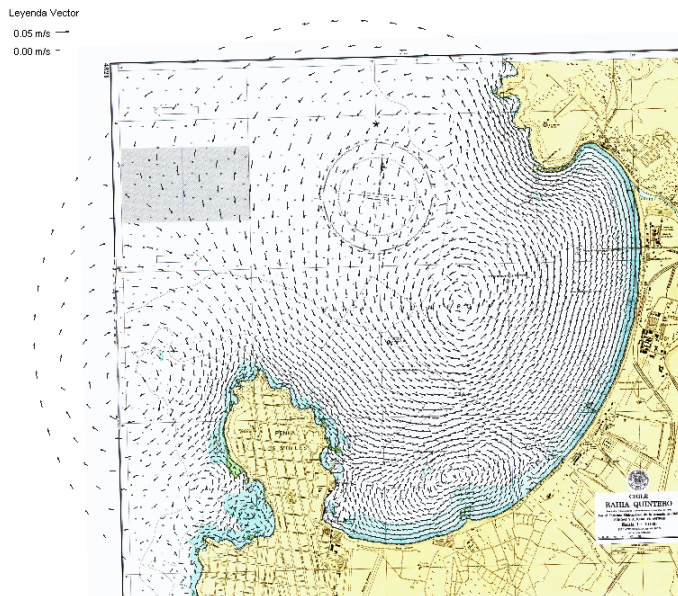
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-6: Simulación dinámica – 9 horas.



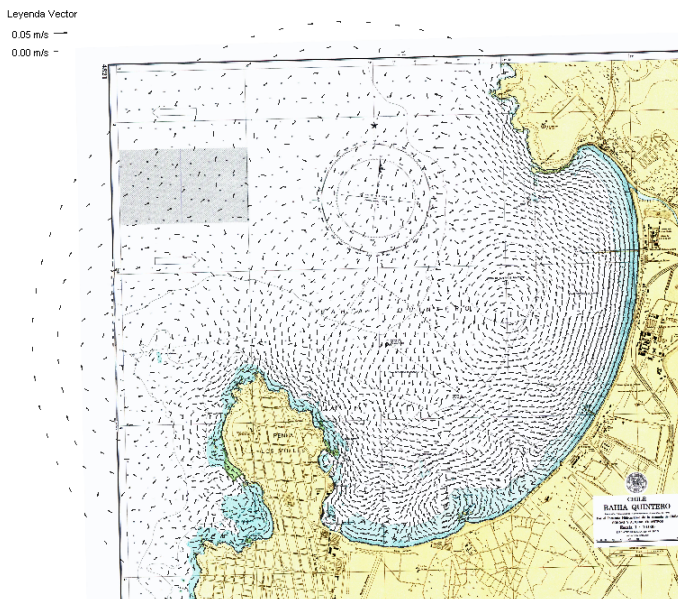
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-7: Simulación dinámica – 12 horas.



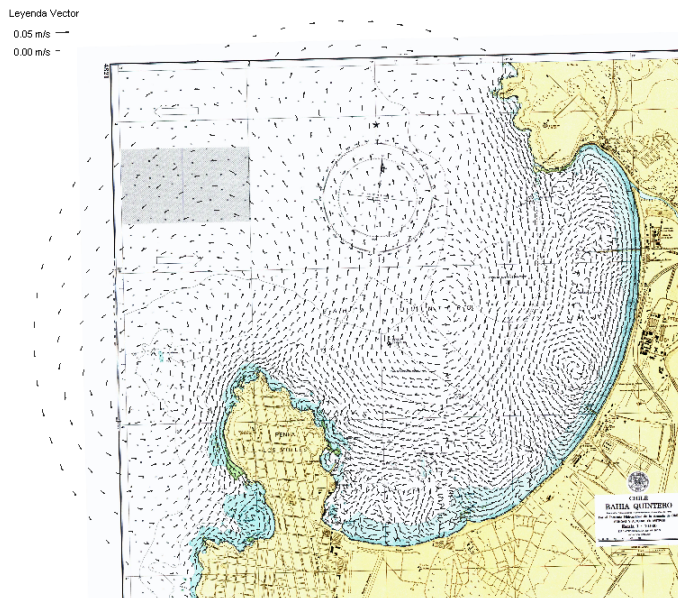
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-8: Simulación dinámica – 15 horas.



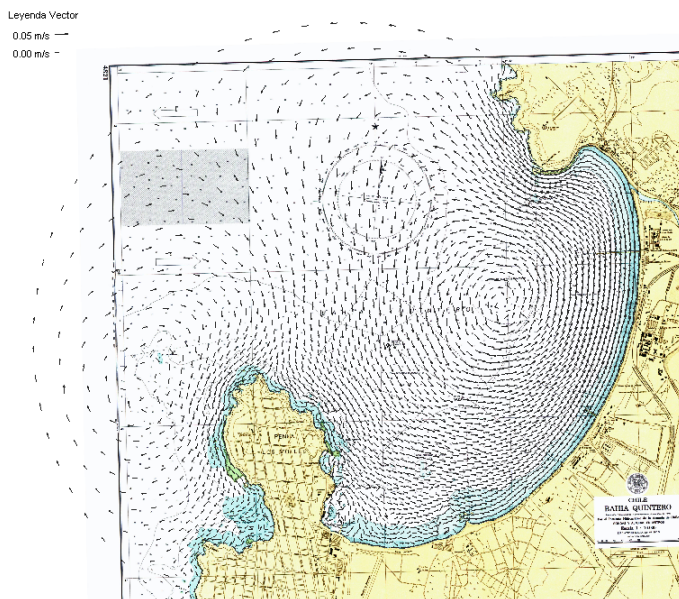
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-9: Simulación dinámica – 18 horas.



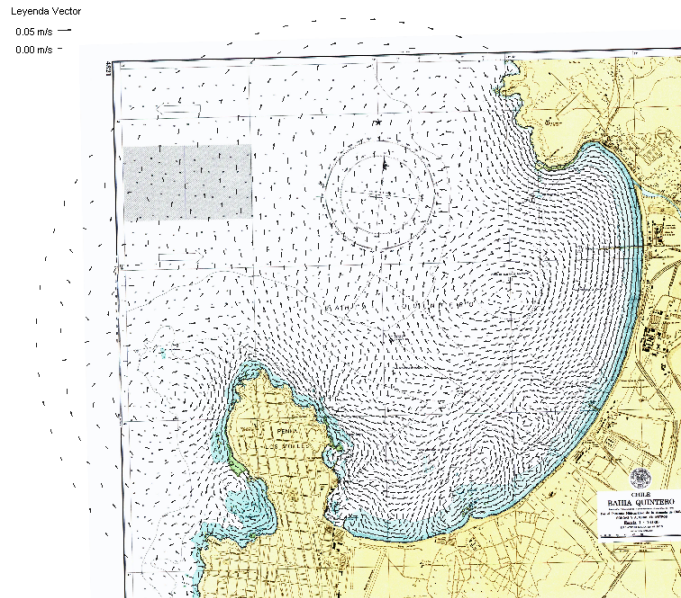
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-10: Simulación dinámica – 21 horas.



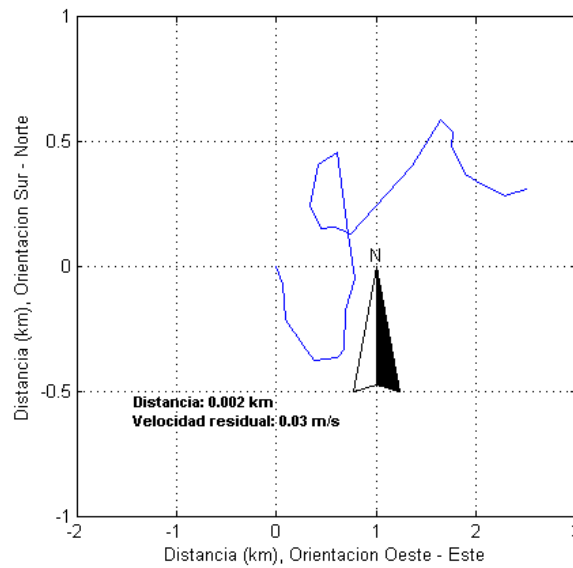
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-11: Simulación dinámica – 24 horas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-12: Vector progresivo corriente superficial.

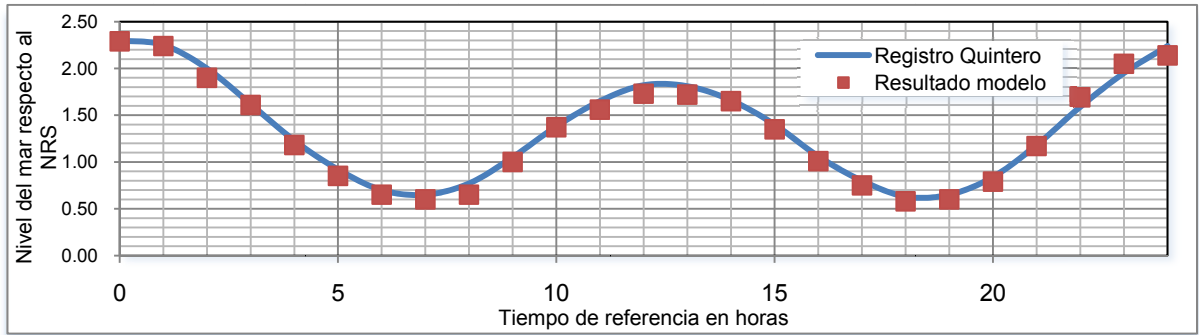


Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a la representación del nivel del mar, se obtuvo un ajuste adecuado, situación que es mostrada en la Figura 4-13. La buena representación de esta variable es en parte atribuible al hecho de incorporar en las condiciones de borde una señal desfasada en cada nodo, lo que no necesariamente representa exactamente la situación real.

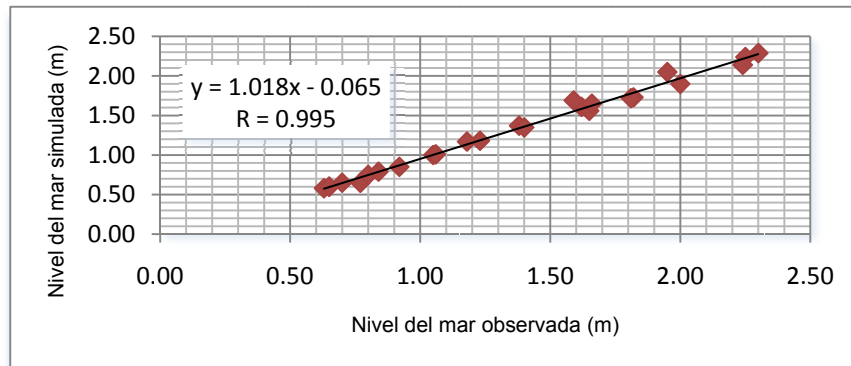
En los resultados obtenidos de la correlación lineal entre las mareas observadas y simuladas (Figura 4-14), se reconoce un alto grado de correlación de 0,99 y para saber si la correlación es significativa se aplicó la prueba de t-Student en el nivel de significación 0,01 (99% de confianza) con un grado de libertad, obteniendo como resultado 23,27 mayor que el valor crítico de $t_{0,99}$, por lo que la correlación es significativa, concluyendo que el modelo hidrodinámico simula en forma óptima el nivel medio del mar.

Figura 4-13: Comparación magnitud de corrientes observada versus simulada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-14: Correlación marea observada versus simulada.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 DERRAME DE HIDROCARBURO EN BAHÍA QUINTERO

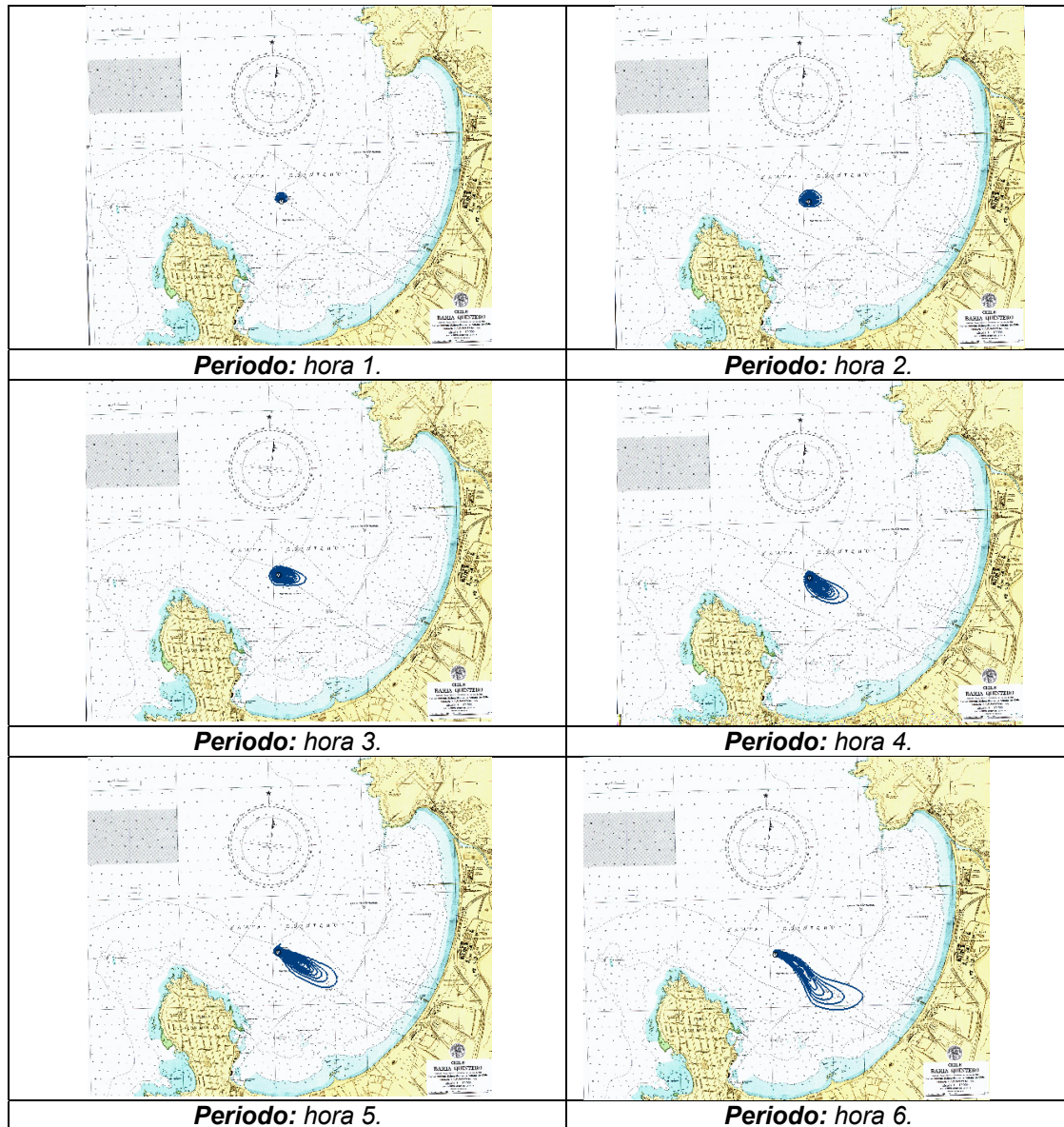
En general para observar el movimiento de la mancha de petróleo o derrame resulta conveniente emplear las isolíneas de concentración, además que nos permite tener una visión más clara de su expansión, clarificando los contornos. Dentro de las condiciones impuestas al modelo se determinó el coeficiente de difusión el cual representa la dispersión o expansión horizontal y depende de las propiedades físicas del fluido que se dispersa y del medio continuo en el cual se dispersa.

Se realizó una simulación de derrame de IFO-180, en Monoboya propiedad de ENAP Refinerías, se estimó la concentración inicial de 95 kg/m^3 , a partir de formulación presentada en Capítulo 3, apartado 2.6.3 “Concentración del Hidrocarburo Derramado en el Medio”. Si bien, no se realizaron análisis con el coeficiente de decaimiento, debido a que dicho coeficiente caracteriza la pérdida del

contaminante cuando éste desaparece por medio de algún tipo de procesos químico, el cual está fuera de los alcances del presente trabajo.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos a través de un coeficiente de dispersión de $6,66 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y $0,129 \text{ m}^2/\text{s}$, para el eje x e y, respetivamente. Una concentración de $95 \text{ kg}/\text{m}^3$ para el hidrocarburo IFO-180, asumiendo un derrame en el Terminal de Monoboya propiedad de ENAP Refinerías.

Figura 4-15: Escenarios analizados por el modelo de calidad de agua RMA4.



Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar en Figura 4-15 que el efecto de la dispersión en la variación temporal de la concentración, se simuló un pulso de 6 horas de duración de derrame de IFO-180, según se puede apreciar que la variación depende de la hidrodinámica del sector a estudio, en este caso de la bahía de Quintero.

Analizando los resultados obtenidos por el modelo RMA4, se observa que en la primera hora de iniciado el derrame su propagación no se encuentra afectada por las corrientes ni el viento; para este caso se observa que la mancha de hidrocarburo se mantiene cercana o circundando el punto del derrame, en donde la magnitud de la corriente es 0,03 m/s y vientos de 1,48 m/s con dirección ENE.

Para la segunda hora la magnitud de la corriente en el punto de vertido es de 0,14 m/s, manteniéndose las condiciones de viento de la primera hora, observándose que la mancha de hidrocarburo tiende a dirigirse hacia el primer cuadrante. Para el período de “3 horas”, se observa que sigue en forma general el patrón de circulación de corrientes marinas superficiales, manteniéndose la magnitud de la corrientes en el orden de los 0,47 m/s con vientos de 1,48 m/s y dirección SW; con un claro desplazamiento hacia el SE, característica que se mantiene hasta el final del período de simulación (6 horas), en donde además se puede visualizar una deflexión del derrame hacia el E.

En cuanto a la magnitud de la corriente, hacia el período de 4 horas se mantienen en el orden de 0,43 m/s, con vientos de 1,48 m/s y dirección SW, valor que aumenta levemente hacia la hora 5 y 6 en donde la magnitud de la corriente se mantienen en 0,44 y 0,47 m/s con vientos de 1,3 y 3,9 m/s con dirección NW y SW, respectivamente.

5 CONCLUSIONES

En este capítulo se analizan los contenidos y resultados expuestos en el trabajo, se presentan las principales conclusiones y se señalan algunas recomendaciones para la realización de estudios posteriores.

A continuación se comentan los contenidos y resultados expuestos en el trabajo, comenzando con analizar los resultados relativos a la aplicación de ésta en la Bahía de Quintero, V Región.

5.1 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DEL TRABAJO

Con el objeto de caracterizar las corrientes del lugar, se recopilaron los datos necesarios para aplicar los modelos numéricos RMA2 y RMA4, para el caso de un derrame en la Bahía de Quintero.

- En cuanto a la batimetría, fue obtenida a través de la carta náutica para desarrollar un modelo numérico.
- Se consiguió un registro del nivel del mar con una duración apropiada para desarrollar el análisis de acuerdo a las exigencias del instructivo N°3201, SHOA, aunque lo ideal hubiese sido poder contar con registros en más puntos al interior de la bahía para verificar el modelo.
- También se consiguieron mediciones de corrientes en la zona, adecuadas para calibrar el modelo.

Se aplicó el modelo RMA2 para caracterizar las corrientes originadas por mareas en la región definida. Este procedimiento constituye una práctica apropiada para estimar la dispersión sobre cualquier contaminante, ya que incluye las variables más importantes asociadas a este fenómeno.

Por otra parte, el período de modelación adoptado permite incorporar las causas principales de la variabilidad temporal del recurso, por lo que obtiene una estimación representativa de las corrientes del lugar.

Uno de los problemas más importantes se originó en la aplicación del modelo hidrodinámico fue la definición de las condiciones de contorno. La practica común en este tipo de modelaciones es la de extraer los parámetros de amplitud y desfases, de base de datos confeccionadas a partir de resultados de modelos desarrollados a una escala global, lo cual se escapa del desarrollo del presente trabajo. Además que su aplicación por parte de la Autoridad Marítima implicaría una demora en la respuesta ante un accidente de derrame de hidrocarburo.

Como alternativa se estimó la utilización del registro disponible para caracterizar las variaciones del nivel del mar en los contornos del modelo, debido a que la región de modelación es relativamente pequeña, asumiendo que la variación del nivel del mar en los contornos mantiene un comportamiento similar.

Con los resultados de la modelación hidrodinamica fue posible distinguir:

- Los resultados obtenidos a partir del ajuste de regresión lineal para obtener el coeficiente de correlación entre las componentes ortogonales de la serie observada y modelada de

corrientes se reconoce una grado de asociación significativa de la componente u, mientras que al contrastar las componentes v de la serie observada y modelada se obtuvo un coeficiente de correlación no es significativa. Esto puede deberse a las características propias del modelo que no considera el efecto barotrópico y baroclínico¹³ que se produce en la Bahía de Quintero y que juega un papel fundamental en su patrón de circulación.

- En la correlación lineal entre las mareas observadas y simuladas se reconoce una gran similitud (coeficiente de correlación significativo de 0,99), es decir, el modelo hidrodinámico ha mostrado la capacidad de simular muy bien este agente forzante.
- Los resultados obtenidos mediante la modelación matemática para la dispersión del hidrocarburo IFO-180, contrastado con la ocurrencia de eventos reales en la Bahía de Quintero, y en consideración a los antecedentes proporcionados por personal perteneciente a la Autoridad Marítima; se indica que gran parte de los derrames han ocurrido en ó próximos al período estival, es decir, frente a una clara predominancia de vientos del 2^{do} y 3^{er} cuadrante. En cuanto al tiempo de desplazamiento, los derrames ocurridos en el sector de la Monoboya han impactado la zona costera en lapsos de horas, en general, dentro de las 6 primeras horas, lo que ha sido dependiente de las características del producto y de las condiciones meteo-oceanográficas imperantes durante la emergencia.
- Si bien se ha probado la versatilidad de estos modelos a la hora de predecir el comportamiento superficial de una mancha de petróleo, el tiempo de cálculo necesario para ello (6 horas) no responde al involucrado en contingencias reales, las cuales requieren tener este tipo de resultados en un lapso no superior a las 3 horas.

Las principales conclusiones del estudio desarrollado son:

- En la actualidad son numerosos los modelos matemáticos empleados para la determinación de las características hidrodinámicas de una zona litoral, si bien es necesario señalar que el estado de conocimiento actual no lo garantiza, debido a las dificultades propias de un buen calibrado y a la hipótesis de formulación que los modelos. En general se considera una aproximación de $\pm 5\%$ en niveles y $\pm 20\%$ en velocidades es aceptable.
- La elección de la hidrodinámica y las condiciones que se utilizan para representar el comportamiento del petróleo en el fondo o la costa son determinantes para obtener resultados próximos a la realidad.
- No es recomendable utilizar el modelo RMA2 para resolver problemas donde los vórtices o aceleraciones verticales sean de principal importancia.
- La aplicación de los modelos RMA2 y RMA4 permiten modelar el proceso físico de dispersión que determina el transporte de petróleo en el mar, así como también su aplicación como herramienta de prevención frente a derrame de hidrocarburo en sectores costeros.

¹³ En el mar podemos distinguir, respecto a la densidad, dos situaciones básicamente distintas. Si la densidad varía de modo semejante a la presión, se habla de una situación o régimen barotrópico. Por el contrario si las variaciones de densidad no están correlacionadas con las de presión (debida, por ejemplo, a una distribución irregular de salinidad), se habla de una situación o régimen baroclínico.

- Por lo anterior, los modelos evaluados establecen ser buenas herramientas de prevención de derivas de derrames y en la preparación de planes de contingencia de instalaciones fijas (boyas, puertos y terminales marítimos).

5.2 RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones orientadas principalmente a los estudios que deben incorporarse en una segunda etapa de investigación y a otros que, en general, contribuyan a un mayor conocimiento de este tipo de tecnologías.

- Estudios de impactos sobre especies y fauna de la zona.
- Análisis detallado de los derrames de hidrocarburos desde el punto de vista químico, incluyendo todos los procesos físicos que lo afectan como es el oleaje y la densidad del cuerpo receptor.
- Se constata la necesidad de incluir procesos como la turbulencia generada por el oleaje en la capa superficial del océano par poder cuantificar de forma correcta tanto la entrada de petróleo como su permanencia en la columna de agua.
- En base a los resultados obtenidos, la mejora de esta modelización pasa necesariamente por la incorporación de la interacción del petróleo con la costa.
- Dado que la simulación del movimiento del petróleo no resulta realista si se considera formando por concentración uniforme, será necesario encontrar la mejor forma que represente la dinámica de la mancha, abriendo una nueva línea de investigación.

6 REFERENCIAS

- I. Bakovic y Balic Ingenieros Consultores Ltda. 1984. *Estudio de Prefactibilidad Técnica y Económica Alcantarillado Litoral Norte*. Chile. Colección Monografías y Ensayos. Serie IV Temas Económicos y Financieros, 238 pp.
- II. Betancourt FO. 2001. *Modelado Numérico de Derrames de Hidrocarburos en Cuerpos de Agua*. Tesis Maestría, Facultad de Ingeniería, División de Posgrado. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 167 pp.
- III. Blokker, P.C. 1964. *Spreading and evaporation of petroleum products on water*. Presented to the Fourth International Harbor Conference, June 22- 27, Antwerp.
- IV. Buscaglia G., Dari E., Zamonsky O. (Eds.). 2004. *Efecto de los Coeficientes de Dispersión sobre la Modelación Bidimensional del Transporte de Contaminantes. Caso de Estudio*. Artículo para Revista Mecánica Computacional Vol. XXIII, pp. 1201 – 1214, Bariloche, Argentina.
- V. Contreras L. 2001. *Introducción al Análisis de Series de Tiempo para Oceanografía y Geo-Ciencias*. Libro Guía para clases. Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 95 pp.
- VI. Chatfield, C. 1975. *The Analysis of Times Series: Theory and Practice*. Chapman & Hall, London. 263 pp
- VII. Del Álamo, M., 1993. *Contra reloj recogida de vertidos de hidrocarburos*. Dirección de Planificación Gestión Tecnológica. Revista Tecnología MOPT, Costa Rica. 44 – 50.
- VIII. Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Chile). 2007 ORDINARIO N°12600/184 VRS: aprueba Circular de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante, Ordinario N° A 53/001, Valparaíso, 09 de Marzo de 2007. DGTMA y MM, Valparaíso.
- IX. Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Chile). 1994. Manual sobre la contaminación ocasionada por hidrocarburos. Parte II: Planificación para Contingencias, 63 pp. DGTM y MM, Valparaíso.
- X. Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (Chile). 1994. Manual sobre la contaminación ocasionada por hidrocarburos. Parte IV: Lucha contra los derrames de hidrocarburos, 214 pp. DGTM y MM, Valparaíso
- XI. Escobar A; Barros F.; Poblete R. 1971. *Estudio de Facilidades Portuarias Para ENAMI en bahía Quintero*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile, Santiago, 242 pp.
- XII. Evans, L.; Davidson, Margaret A.; Vice Admiral Conrad C. Lautenbacher. Jr. *Manual de Análisis de Trayectoria. Servicio Nacional Oceánico. Oficina de Respuestas y Restauración*. División de Respuesta a Materiales Peligrosos. Administración Nacional de Océanos y Atmósfera (NOAA). 25 pp.

- XIII. García RN, 2009. *Evaluación del Potencial de la Energía Originada por Corrientes de Marea para Generación en Sistemas Aislados*, Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Obras Civiles. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. 210 pp.
- XIV. Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental, Depto. De Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. 1995 Metodología de Estudio de los Saneamientos Litorales Universidad de Cantabria, España. 202 pp.
- XV. Ilustre Municipalidad de Quintero, 2006. Plan de Desarrollo Comunal de Quintero, (PLADECO), 2006, Ilustre Municipalidad de Quintero, V Región. 125 pp.
- XVI. Kimberly D. Leung. 2007. *Hydrodynamic Modeling Hampton/Seabrook – Harbor, New Hampshire*. University of New Hampshire in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of Master of Science in Ocean Engineering, EE.UU. 129 pp.
- XVII. Lindeburg MR. 1992. *Civil Engineering Reference Manual*; Civil Engineering Reference Manual for the PEEXAM. Professional Pubs Inc., EE.UU. 1064 pp.
- XVIII. Malet y Andrade. 1991. *Caracterización Espacio-Temporal de las Condiciones Oceanográficas en Relación a Indicadores de Calidad Ambiental de la Bahía de Quintero: Caso de Estudio*, Aprobación CONICYT. Facultad de Medicina, Facultad de Oceanología, Universidad de Valparaíso, Valparaíso.
- XIX. Moffatt & Nichol. 2007. *Alamitos Bay Circulation Study: Final Report*. Prepared for City of Long Beach Dept. of Public Works, Long Beach, CA. Aug. 30. 41 pp.
- XX. Moreira RC, 2004. *Sistema de Información para la Modelación Matemática de Derrames de Hidrocarburo en Ambiente Marino*, Tesis de Maestría en Tecnología de Ambiental. Escuela de Ingeniería. Universidad de Minho, Portugal. 300 pp
- XXI. NOAA. 2001. Manual de Análisis de Trayectoria [en línea]. Seattle: Administración Nacional de Océanos y Atmosfera NOAA [fecha de consulta: 03/05/2009]. Disponible en: http://response.restoration.noaa.gov/book_shelf/937_trayect.pdf.
- XXII. Olaso S. 2008. *Análisis de la expansión de manchas de vertidos de crudo en el mar*. Tesis para optar el Título de Ingeniero en Minas. Departamento de Ingeniería Química y Combustibles. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. 208 pp.
- XXIII. Rory O.R. Y. Thompson, 1983. *Low-Pass filters to Suppress Inertial and Tidal Frequencies*. Division of Oceanography, CSIRO Marine Laboratories, Hobart, Tas. 7001, Australia.
- XXIV. Santos, DG., 1998. *Modelo Tridimensional de Camino Aleatorio para un Derrame de Petróleo*. Aplicación al derrame producido por el “North Cape”. Tesis Doctoral, Departamento de Física. Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 346 pp.
- XXV. Sorial G, Smith F, Suidan M, Pandit A, Biswas P, Brenner R. 1997. *Evaluation of trickle bed air biofilter performance for BTEX removal*. ASCE Journal of Environmental Engineering. Junio 1997 No. 6: 530.
- XXVI. WES-HL (2000) Users Guide To RMA4 WES Version 4.5, US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory, Vicksburg, USA.

7 ANEXOS

ANEXO A: TASAS DE TRANSFERENCIAS DE TERMINALES MARÍTIMOS (2000 – 2007)

Tabla A-1: Tasas de transferencia de los terminales, 2000 a 2007.

R=Recepción.
E=Entrega.

Terminal	Propietario	Productos	Tasas de transferencia Ton/hora															
			2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007	
			R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E
OXIQUIM S.A. SITIOS: NORTE Y SUR	OXIQUIM S.A.	METANOL	160	-	160	-	160	-	160	-	160	-	160	-	160	-	160	-
		SODA CAUSTICA	160	-	160	-	160	-	160	-	160	-	160	-	160	-	160	-
		SULFIDRATO SODICO	70	-	70	-	70	-	70	-	70	-	70	-	70	-	70	-
		ETANOL	160	-	160	-	160	-	160	-	160	500	160	-	160	-	160	-
		PERCLORETILENO	70	-	70	-	70	-	70	-	70	400	70	-	70	-	70	-
		ACIDO SULFURICO	-	500	-	500	-	500	0	500	-	-	-	500	-	500	-	500
MULTIBOYA LPG	REFINERIA DE PETROLEOS DE CONCON S.A.	PROPANO-BUTANO	320	400	320	400	320	400	320	400	320	2000	320	400	320	400	320	500
		PRODUCTOS LIMPIOS E IFO	-	-	-	-	-	-	0	-	-	1000	-	-	-	-	-	-
MULTIBOYA ENAP	REFINERIA DE PETROLEOS DE CONCON S.A.	FUEL OIL	1000	2000	1000	2000	1000	2000	1000	2000	1000	2580	1000	2000	1000	2000	1000	2000
		PRODUCTO LIMPIO	560	1000	560	1000	560	1000	560	1000	560	-	560	1000	560	1000	560	1000
		CRUDO	1300	2580	1300	2580	1300	2580	1300	2580	1300	5500	1300	2580	1300	2580	1300	2580
		IFO-180	400	-	400	-	400	-	400	-	400	-	400	-	400	-	400	-
MONOBOYA	REFINERIA DE PETROLEOS DE CONCON S.A.	CRUDO	1300	5500	1300	5500	1300	5500	1300	5500	1300	-	1300	5500	1300	5500	1300	5500
SITIO 1	PUERTO	DIESEL	-	100	-	100	-	100	0	100	-	100	-	100	-	100	-	100

**“EVALUACIÓN DE HERRAMIENTA TECNOLÓGICA
COMO APOYO A LAS ESTRATEGIAS FRENTE A DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN EL MAR”**

Terminal	Propietario	Productos	Tasas de transferencia Ton/hora															
			2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007	
			R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E
	VENTANAS S.A.	IFO 180	-	400	-	400	-	400	0	400	-	400	-	400	-	400	-	400
		IFO 380	-	600	-	600	-	600	0	600	-	600	-	600	-	600	-	600
SITIO 2		DIESEL	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100
		IFO 180	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150
SITIO 3		IFO 380	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250
		ASFALTO	800	-	800	-	800	-	800	-	800	-	800	-	800	-	800	-
SITIO 5		BASE STOK	1200	-	1200	-	1200	-	1200	-	1200	-	1200	-	1200	-	1200	-
		DIESEL	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100
SITIO 5		IFO 180	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150
		BASE STOK	1600	-	1600	-	1600	-	1600	-	1600	-	1600	-	1600	-	1600	-
SITIO 5		DIESEL	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100	800	100
		IFO 180	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150	400	150
SITIO 5		IFO 380	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250
		IFO 380	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250	600	250
EL BATO	SHELL CHILE S.A.	IFO 180 - 380 Y LUBRICANTE	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	625	750	625	750	625	750
TERMINAL BARCAZA	REFINERIA DE PETROLEOS DE CONCON S.A.	DIESEL	150	-	150	-	150	-	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		IFO 180 - 380	300	-	300	-	300	-	300	-	-	-	600	-	600	-	600	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A-2: Registros históricos de derrames ocurridos en la Bahía de Quintero.

Año	Tipo de Emisor	Nombre	Bandera	Motivo Derrame	Tipo de Producto	Cantidad (m ³)
1991	Empresa	Oxiquim	Chilena	Rotura de Flexible	Percloroetileno	140,000
1992	Petrolero	Alpaca	Chilena	Faena Descarga Multiboya RPC	Diesel Oil	0,500
1994	Tanker	Cabo Pilar	Chilena	Derrame Petróleo	Fuel - Oil	0,100
1994	Towing	Ultramar XIV	Chilena	Varamiento	Fuel-Oil	0,050
1995	Petrolero	Abtao	Chilena	Faena de Embarque	Hidrocarburos	1,500
1996	Petrolero	Xing Kay Hu	China	Deslastre Estanques	Fuel - Oil	5,000
1996	Petrolero	Abtao	Chilena	Falla Válvula	Aceite Pesado Diesel	0,300
1997	Gasero	Vicuña	Chilena	Rebalse	Petroleo Crudo	0,150
1997	Rotura Term. Multiboya RPC. Flexible Diesel	-	-	Rotura	Diesel	0,500
1998	Petrolero	Mega Sun	Noruego	Fisura Casco	Crudo	0,080
1998	Petrolero	Corcovado	Malta	Bombeo	Crudo	0,500
2000	Terminal Marítimo	Puerto Ventanas	Chilena	Rotura Cañería	IFO 180	12,000
2000	Granelero	Alam Sentosa	Malasia	Tocada de Fondo	IFO 180	5,000
2000	Monoboya RPC	RPC	Chilena	Flange Suelto	Petroleo Crudo	0,200
2001	Cta. Ventana	Desconocido	S/Inf.	Residuos de Sentina	Sentina/Aceite	0,400
2002	Monoboya	RPC	Chilena	Colisión Gasero Cronos	Crudo	0,050
2003	Petrolero	Pacsa	Chilena	Falla Válvula	IFO 380	16,000
2003	Terminal Multiboya	RPC	Chilena	Corte Espías	Diesel	3,000
2004	Ducto	RPC	Chilena	Rotura Ducto	IFO 180	0,300
2006	Petrolero	Alpaca	Chilena	Tube Desahogo con Pitting	IFO 380	0,010

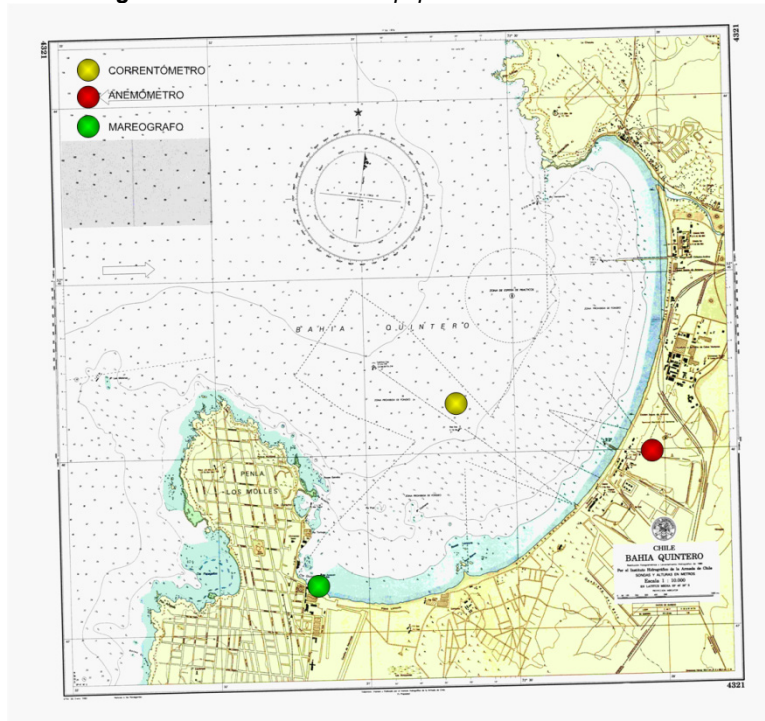
Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B: MEDIO AMBIENTE FÍSICO DE LA BAHÍA DE QUINTERO

INTRODUCCIÓN

La presente sección contiene la descripción de las condiciones oceanográficas (vientos, mareas y corrientes) de la Bahía de Quintero, datos que fueron obtenidos en salida a terreno durante el periodo de invierno del año 2006 (agosto a septiembre). La ubicación de los equipos utilizados para la medición de los parámetros oceanográficos analizados en esta sección se muestra en Figura B-1 y Tabla B-1.

Figura B-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-1: Ubicación de equipos utilizados en estudio.

Equipo	Coordenadas Geográficas	
	Latitud	Longitud
Anemómetro	32°46'20.38"S	71°29'24.63"O
Correntómetro	32°46'15" S	71°30'21"O
Mareógrafo	32°46'48.20"S	71°31'35.63"O

Fuente: Elaboración propia.

El principal criterio empleado para la selección de los datos de campos fue la disponibilidad de dicha información; y las especificaciones en “Instrucciones Oceanográficas SHOA Pub. 3201 Instrucciones Oceanográficas N° 1 Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos, 3ª edición 2005”.

BATIMETRÍA

Las profundidades marinas de la Bahía de Quintero están señaladas en la Carta Náutica N° 4321; el cual se considera confiable y fidedigno para los propósitos del estudio.

MAREAS

El objetivo de la presente sección es registrar y analizar las variaciones del nivel del mar en la Bahía de Quintero, V Región; en donde el ascenso y descenso del nivel del mar en respuesta al efecto gravitacional de la luna y el sol sobre las aguas representa una fuerza fundamental en la dinámica de las aguas. Este proceso cobra importancia en zonas costeras, como por ejemplo en bahías, representando en algunos casos la principal fuerza que genera la circulación o bien la modifica. Por lo tanto, el conocimiento del régimen de marea es fundamental y en esta sección se incluye régimen mareal y análisis no armónico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la determinación del régimen de marea en el área de interés se utilizó el criterio definido por el coeficiente de Courtier (Pub. SHOA. N° 3013, "Glosario de Marea y Corrientes"). Este coeficiente, se obtiene del cociente de las amplitudes de cuatro de los constituyentes armónicos principales, obtenidos mediante el análisis armónico del nivel del mar.

Las mareas del tipo diurno son producidas principalmente por los constituyentes K_1 y O_1 , en tanto que las mareas del tipo semidiurno son producidas principalmente por los constituyentes M_2 y S_2 ; las cuales se pueden expresar:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

Donde:

- K_1 : Componente diurna lunisolar de declinación.
- O_1 : Componente lunar de declinación diurna.
- M_2 : Componente lunar principal semi-diurna.
- S_2 : Componente solar principal, semi-diurna.

De esta manera:

- $F < 0,25$ Régimen semidiurno.
- $0,25 < F < 1,50$ Régimen mixto semi-diurno.
- $1,50 < F < 3,00$ Régimen mixto diurno.
- $F > 3,00$ Régimen diurno.

Para los datos registrados en la Bahía de Quintero, se estima que el parámetro de Courtier es $F = 0,436$; implicando que el régimen de esta bahía es de tipo semi-diurno mixto, es decir, en un día se presenta la ocurrencia dos pleamares y dos bajamares, con diferencia entre ellas.

En base a los análisis efectuados se determinó el plano de referencia del comportamiento de la marea en el sector de estudio (Ver Tabla B-2). El cálculo del Nivel de Reducción de Sondas (N.R.S.) o altura mínima esperable se realizó de acuerdo a la metodología expuesta en Pub. SHOA N° 3105, “Instrucciones Hidrográficas N° 5”:

$$NRS = Z_0 - (H_{M_2} + H_{S_2} + H_{N_2} + H_{K_1} + H_{O_1})$$

Donde:

- Z_0 : Nivel Medio del Mar.
- H_{M_2} : Semiамplitud constituyente lunar principal semidiurno.
- H_{S_2} : Semiамplitud constituyente lunar eclíptica mayor semidiurno
- H_{N_2} : Semiамplitud constituyente lunar eclíptica mayor semidiurno.
- H_{K_1} : Semiамplitud constituyente lunisolar declinacional diurno.
- H_{O_1} : Semiамplitud constituyente lunar declinacional diurno.

Tabla B-2: Valores No - Armónicos.

Plano Mareal	Sobre Cero Registro (m)
Altura Pleamar más Alta Observada	2,35
Altura Media de las Pleamares más Altas	1,97
Altura Media de las Pleamares	1,78
Nivel Medio del Mar	1,34
Nivel Medio de la Marea	1,33
Altura Media de las Bajamares	0,89
Altura Media de las Bajamares más Bajas	0,81
Altura Bajamar más Baja Observada	0,50
Nivel de Reducción de Sondas (N.R.S.)	0,41

Fuente: Elaboración propia.

VIENTOS

Entre los agentes forzantes de las corrientes, el viento es uno de los más importantes ya que proporciona la energía primaria para el movimiento de las aguas superficiales. El cuerpo de agua responde a este traspaso de energía, entrando en movimiento, y su intensidad puede ser proporcional a la del viento. La transferencia de energía cinética entre el océano y la atmósfera, está modulada por la topografía local, estacionalidad, extensión y duración del *fetch*.

El estudio de viento fue enfocado hacia los estudios oceanográficos, ingeniería de diseño y faenas de operatividad. Se utilizaron los datos correspondientes a una estación automática y autónoma marca HOB0 con sensor de intensidad y dirección de viento (anemómetro).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de vientos fueron referidos al norte geográfico, calculándose la estadística básica (media, varianza, mínimo y máximo) de los; posteriormente se obtuvo la respectiva frecuencia de incidencias por rango de dirección (rosa de 16 direcciones) y magnitud. Dichos datos comprenden un total de 119 días de medición, el período considerado fue desde el día 04 de Agosto del 2006 al día 30 del Noviembre del 2006; siendo el intervalo de muestreo de 60 segundos.

En el análisis se empleó la totalidad de las observaciones de vientos con una resolución temporal de medición del viento en intervalos discretos de un minuto. Los vientos con magnitudes iguales o inferiores a 0,3 m/s fueron considerados calmas, ya que éstos son muy débiles y poco significativos en los procesos de transferencia de energía desde la atmósfera al océano, de acuerdo a escala Beaufort.

PERIODO 04/08/2006 AL 30/11/2006

La estadística básica de la intensidad del viento se presenta en Tabla B-3, en donde se destaca que la varianza de los datos es de 1,297 m/s, registrándose un máximo de 6,750 m/s, correspondiente a escala Beaufort 4, “Viento Moderado”.

En el análisis de la frecuencia de la intensidad del viento en la Bahía de Quintero, para el período de agosto-noviembre del 2006, en Tabla B-4 se observa que el 6,1% de los datos corresponden a calmas; por otro lado el 42,2% de los datos corresponden al intervalo de 0,3 – 1,5 m/s, correspondiente a vientos brisa débil. Para el rango con magnitudes mayores a 5,5 m/s, los datos registraron el 0,2%.

El análisis de la información revela el predominio de los vientos del E (19,3%) seguido de los provenientes del O (18,7%) y S (13,5%), lo cual se corrobora en Figura B-2, la cual muestra la rosa de vientos (16 direcciones) y se aprecia la distribución de frecuencias para el período analizado.

Tabla B-3: Estadística básica del viento (Agosto – Noviembre 2006).

Valor Estadístico	Magnitud m/s
Máximo	6,75
Mínimo	0,00
Media	1,84
Varianza	1,30

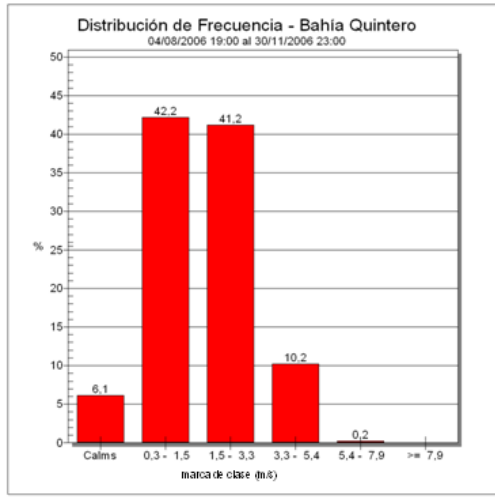
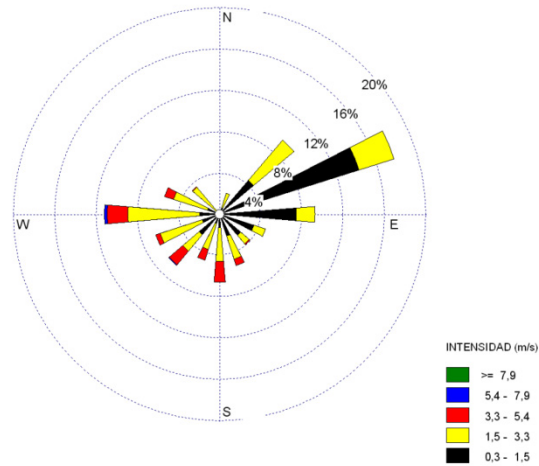
Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-4: Frecuencia de incidencia del viento Agosto – Noviembre 2006).

Dirección/ Rangos de Magnitud m/s	0,3 - 1,5	1,6 - 3,3	3,4 - 5,4	5,5 - 7,9	>=8,0	Total
N	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NE	6,3	6,3	0,1	0,0	0,0	12,7
E	16,1	3,2	0,0	0,0	0,0	19,3
SE	6,8	2,6	0,4	0,0	0,0	9,8
S	3,9	6,9	2,7	0,0	0,0	13,5
SW	3,5	5,7	3,3	0,0	0,0	12,6
W	4,1	11,7	2,7	0,2	0,0	18,7
NW	1,4	4,7	1,0	0,0	0,0	7,2
Sub-Total	42,2	41,2	10,2	0,2	0,0	93,9
Calmas						6,1
Total						100,0

Fuente: Elaboración propia.

Figura B-2: Rosa y distribución de frecuencia de vientos.



Fuente: Elaboración propia.

CORRIENTES EULERIANAS

Este estudio tiene como objetivo principal el caracterizar las variaciones de la magnitud y dirección a través del tiempo de las corrientes de la Bahía de Quintero. El instrumento utilizado para efectuar las mediciones euleriana de corrientes, permite establecer diferentes celdas o capas a lo largo de la columna de agua posibilitando una completa caracterización de la dirección e intensidad de la corriente. Para ello, el perfilador de corrientes RDCP600, utiliza el conocido efecto Doppler, basado en la transmisión de un corto pulso de sonido que es reflejado por las partículas presentes en el agua, las que típicamente corresponden a zooplancton o sedimento en suspensión. El cambio de frecuencia que experimente el eco reflejado dependerá directamente de la velocidad de las partículas.

La profundidad de la sonda es de 16,4 m bajo el NRS, donde la profundidad del equipo es de 16,0 m. El intervalo de muestreo fue de 10 minutos con una frecuencia de 1 MHz.

DETERMINACIÓN DE CELDAS DE PROFUNDIDAD

Considerando la profundidad a la que se instaló el instrumento y el espesor de celda de 2 m, programado para el RDCP600. En cada celda, se obtuvo datos del vector de corriente con un intervalo de muestreo de 10 minutos. Se determinaron 19 celdas (capas), dejando 1 m de solapamiento entre las celdas.

Las mediciones se realizaron desde el 04 de agosto al 30 de noviembre del año 2006. Para el procesamiento se consideró la totalidad del registro. El análisis de los datos se realizó considerando tres niveles (capas) en la columna de agua (superficie, intermedio y fondo). A continuación se muestra la profundidad media de capa usada en el análisis:

Capa 16 3,0 m Profundidad medida desde la superficie.

Capa 8 9,0 m Profundidad medida desde la superficie.

Capa 2 16,0 m Profundidad medida desde la superficie.

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El primer paso del análisis consistió en referir las direcciones registradas al norte verdadero considerando la declinación magnética del área de estudio. Posteriormente se calculó la estadística básica (media, varianza, mínimo y máximo) de los datos de corrientes registrados; luego se obtuvieron las respectivas frecuencias de incidencias por rango de dirección (rosa de 16 direcciones) y magnitud. Para este análisis se empleó la totalidad de las observaciones de corrientes con un intervalo de muestreo de 10 minutos. Se debe destacar que las corrientes con magnitudes iguales o inferiores a 0,01 m/s fueron consideradas calmas.

Según la estadística básica de las series de datos de corrientes registradas cada 10 minutos (Tabla B-5) la máxima intensidad (0,56 m/s) se registro en la capa superficial (3,0 m). La distribución de frecuencia de magnitud de la corriente (Tablas B-6 a B-8 y Figuras B-3 a B-5) indica que en los niveles intermedio y profundo predominan corrientes de baja intensidad (menores a 0,11 m/s) abarcando más del 90% de los registros (considerando las calmas). Mientras que en el nivel superficial se registraron corrientes superiores 0,21 m/s, excediendo el 30%.

Tabla B-5: Estadística básica de las celdas de corrientes.

Valor Estadístico	Celda 16 (m/s)	Celda 8 (m/s)	Celda 2 (m/s)
Máximo	0,56	0,27	0,15
Mínimo	0,00	0,00	0,00
Media	0,15	0,05	0,05
Varianza	0,01	0,00	0,00

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla B-6: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 16.

Rangos de Magnitud (m/s)/ Dirección	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
0,01 - 0,11	1,40	3,08	4,76	8,19	11,81	9,55	5,87	3,08	47,73
0,11 - 0,21	0,68	2,93	2,29	1,82	5,22	4,11	3,04	0,86	20,97
0,21 - 0,31	0,39	6,08	1,65	1,14	5,83	1,18	1,14	0,07	17,50
0,31 - 0,41	0,32	4,83	0,93	0,39	2,11	0,75	0,14	0,04	9,52
0,41 - 0,51	0,00	1,57	0,07	0,04	0,36	0,11	0,00	0,00	2,15
0,51 - 0,61	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
>0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Total	2,79	18,60	9,70	11,59	25,33	15,71	10,20	4,04	97,96
Calmas									2,04
Total									100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-7: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 8.

Rangos de Magnitud (m/s)/ Dirección	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
0,01 - 0,11	5,80	7,44	8,55	12,77	19,25	17,67	14,06	9,23	94,78
0,11 - 0,21	0,18	0,36	0,14	0,43	0,68	0,89	0,18	0,39	3,26
0,21 - 0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,04
0,31 - 0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,41 - 0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,51 - 0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
>0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Total	5,97	7,80	8,69	13,20	19,96	18,57	14,24	9,62	98,07
Calmas									1,93
Total									100,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-8: Frecuencia de incidencia de la corriente celda 2.

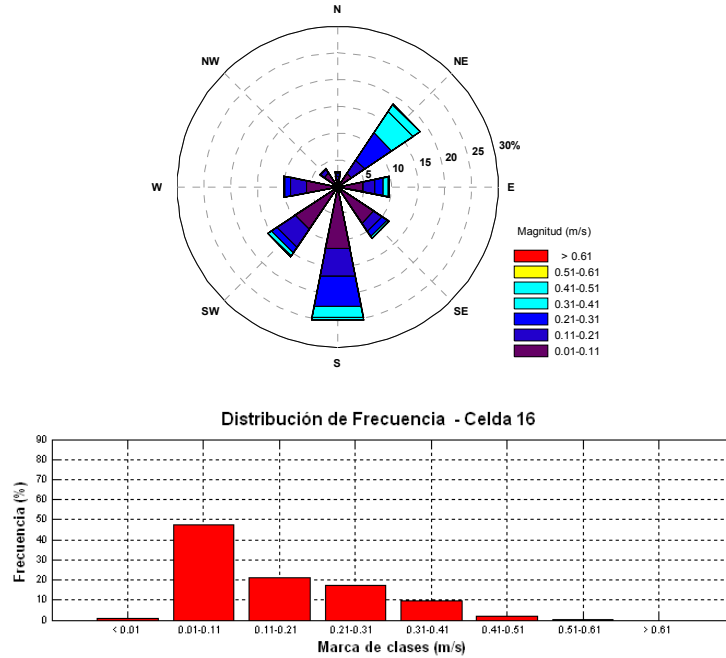
Rangos de Magnitud (m/s)/ Dirección	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
0,01 - 0,11	2,86	8,41	13,74	14,92	12,77	17,10	18,43	8,34	96,57
0,11 - 0,21	0,00	0,04	0,00	0,32	0,14	0,29	0,93	0,00	1,72
0,21 - 0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,31 - 0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,41 - 0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,51 - 0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
>0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Total	2,86	8,44	13,74	15,24	12,92	17,39	19,36	8,34	98,28
Calmas									1,72
Total									100,00

Fuente: Elaboración propia.

La dirección predominante de las corrientes para la zona a nivel superficial fue variable con direcciones SW, S y SE, abarcando en conjunto el 52,63% de los datos; profundidad las direcciones predominaron al E, SE, S, SW y W, mientras que en el nivel intermedio la tendencia fue

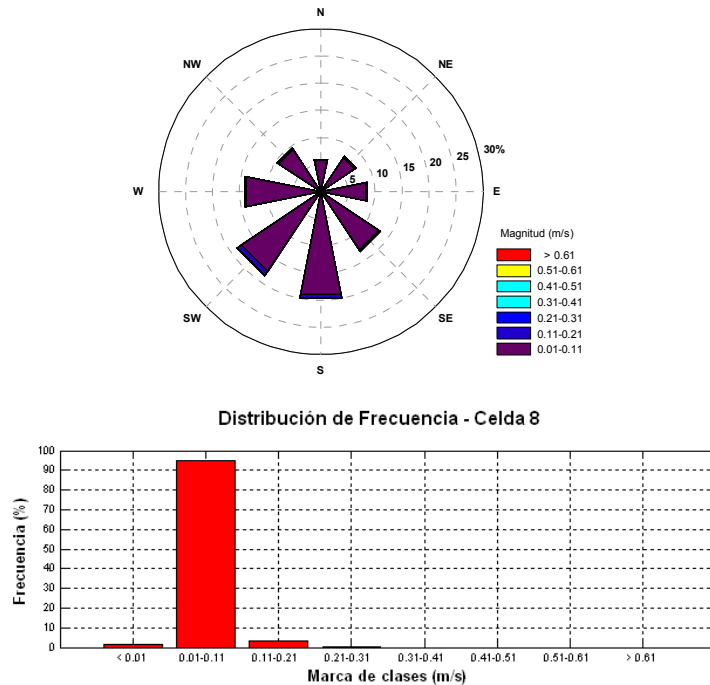
hacia el S y SW, lo que se puede apreciar en las rosas de direcciones (Figuras B-3 a B-5). En general se puede apreciar una tendencia de las corrientes hacia el segundo y tercer cuadrante.

Figura B-3: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 16.



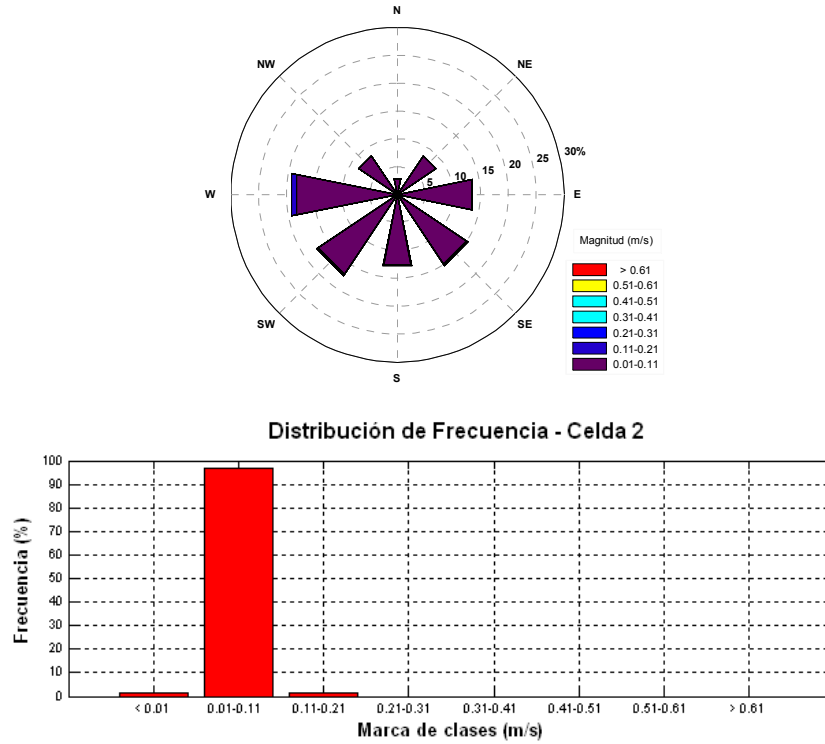
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-4: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 8.



Fuente: Elaboración propia.

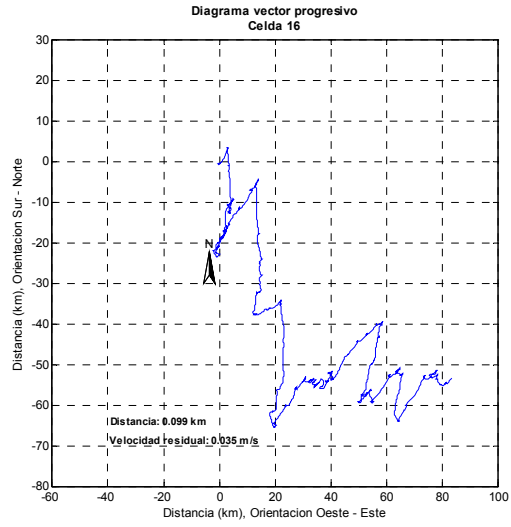
Figura B-5: Rosa y Distribución de Frecuencia Corrientes – Celda 2.



Fuente: Elaboración propia.

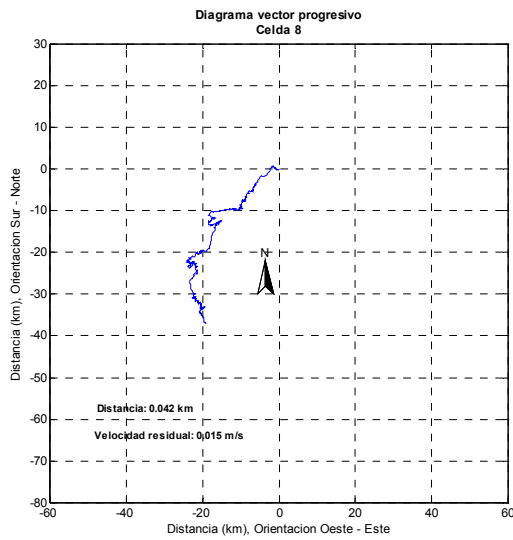
La tendencia residual de la circulación del área de estudio, para el período de la medición, es estimada mediante diagramas de vector progresivo (DVP). Pevio a esto, los datos registrados cada 10 minutos fueron reducidos a valores horarios utilizando un promedio simple. Los diagramas de vector progresivo (DVP, Figuras B-6 a B-8) muestran la tendencia residual de la circulación a diferentes niveles de profundidad durante el período de medición. En todos los niveles se evidenció una circulación residual entre el SW y SE, con una distancia promedio de los tres niveles de 0,059 Km. y una velocidad residual en promedio de 0,021 m/s.

Figura B-6: Diagrama de vector progresivo - nivel superficial.



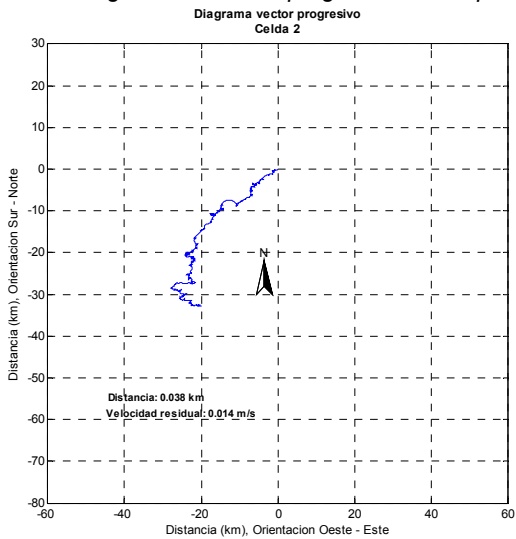
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-7: Diagrama de vector progresivo - nivel intermedio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-8: Diagrama de vector progresivo - nivel profundo.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO C: CARTA AUTORIZACIÓN USO DE DATOS METEREOLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS



Lunes, 25 de mayo de 2009

CARTA N° 2009072

Señor
Patricio Winckler
Ingeniería Oceánica
Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Naturales
Universidad de Valparaíso
Presente

Ref. : Uso de información meteorológica y oceanográfica – Bahía Quintero

De mi consideración:

En relación a lo requerido por la Srta. Maria Karina Oyarce (RUT 15.080.643-7), alumna tesista de la carrera de Ingeniería Civil Oceánico de esa Universidad, en cuanto al uso de información propiedad de OceanGreen Chile S.A. que más adelante se detalla, para desarrollar la tesis denominada “Evaluación de Herramienta Tecnológica como Apoyo a las Estrategias frente a Derrames de Hidrocarburos en el Mar”; tengo a bien autorizar su uso con fines estrictamente académicos y para el referido trabajo.

Variable	Período
Mareas	04/08/2006 al 30/11/2006,
Viento (dirección y magnitud)	04/08/2006 al 30/11/2006,
Corrientes euleriana	04/08/2006 al 30/11/2006,

Sin otro particular, le saluda atentamente,


ISMAEL HORMAZABAL ARAYA
GENERAL MANAGER
OCEANGREEN CHILE S.A.



JA